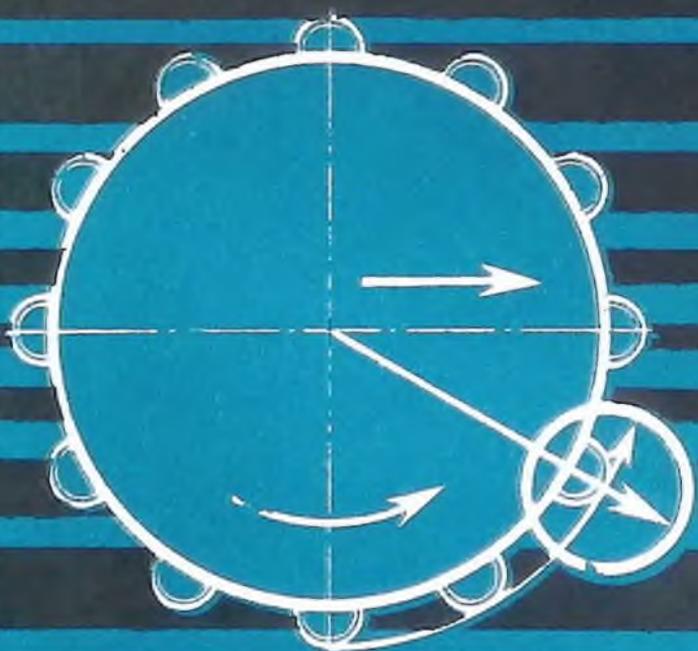


504  
A-57

# АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД



622.23 | 39791  
А-51 | Алмазный  
инструмент для  
резки

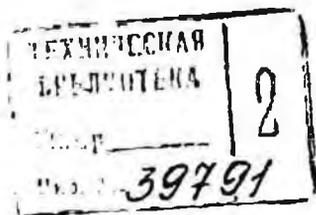
Книга должна быть возвращена не  
позже указанного здесь срока

Количество предыдущих выдач _____	

2004

с. 27, 23  
2-51

АЛМАЗНЫЙ  
ИНСТРУМЕНТ  
ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ  
КРЕПКИХ  
ГОРНЫХ ПОРОД



МОСКВА «НЕДРА» 1980

УДК 622.23.054:621.9.025.7

Алмазный инструмент для разрушения крепких горных пород/А. Ф. Кичигин, С. П. Игнатов, Ю. И. Климов, В. Д. Ярема. — М., Недра, 1980, 159 с.

В книге рассмотрены вопросы применения алмазного инструмента для разрушения крепких горных пород исполнительными органами горных машин. Приведен анализ технологических схем разрушения пород с использованием алмазного инструмента различного конструктивного исполнения и определена область его применения. Получены аналитически и подтверждены экспериментально оптимальные режимы работы, установлены силовые и энергетические показатели разрушения. В результате обобщения аналитических и экспериментальных исследований разработана методика расчета исполнительных органов с алмазным инструментом. Описаны конструкции исполнительных органов машин, оснащенных алмазным инструментом, даны их технические характеристики, определены области применения и экономическая эффективность использования.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, связанных с эксплуатацией и созданием горных машин с алмазным инструментом.

Табл. 10, ил. 87, список лит. — 37 назв.

Рецензент:

проф., д-р техн. наук В. А. Бреннер (Тульский политехнический институт)

А  $\frac{30704-171}{043(01)-80}$  315-80. 250 1020000.

© Издательство «Недра», 1980

## ПРЕДИСЛОВИЕ

За два последних десятилетия в нашей стране и за рубежом в горном деле все более широкое применение получают инструменты, оснащенные как природными, так и синтетическими алмазами. Потребность в алмазном инструменте для разрушения и обработки горных пород удваивается каждые десять лет. В настоящее время ежегодно миллионы карат природных алмазов расходуются при бурении разведочных и эксплуатационных скважин, добыче полезных ископаемых и обработке декоративных и отделочных камней. Особенно интенсивно растет потребность в алмазах зернистостью 500/400—1200/1000 мкм. Алмазный инструмент указанных зернистостей изготавливается в основном импрегнированным, что предопределяет сложность геометрии его рабочей поверхности и трудность изучения процессов, происходящих в зоне контакта инструмента с породой. Наибольшее распространение получили три типа инструмента: буровые коронки, режущие диски и полосовые пилы (штрипсы).

Для правильного проектирования инструмента и параметров исполнительных органов горных машин, а также эффективной их эксплуатации необходимо иметь научно обоснованную методику расчета силовых и энергетических показателей работы и выбора рациональных режимов разрушения породы. В этом направлении ведутся исследования в институтах ВНИИАЛМАЗ, ИСМ АН УССР, ВНИИБТ, ВИТР, в Ереванском институте камня и силикатов, ВНИИНеруд, Карагандинском и Киевском политехнических, Ленинградском горном, Московском геологоразведочном им. Орджоникидзе и др. Однако существующие в настоящее время методики, инструкции и расчетные зависимости но-

сят частный, отраслевой характер, базируются на различных, иногда противоречивых предпосылках. Это объясняется в основном существенными различиями в условиях эксплуатации и кинематике работы инструмента.

В данной книге авторами на основании многолетних аналитических и экспериментальных исследований, обобщения опыта работ как в нашей стране, так и за рубежом приводится общая для трех типов алмазных инструментов методика выбора режимов работы и расчета силовых и энергетических показателей разрушения горных пород.

Предлагаемая методика позволяет достаточно обоснованно назначать режимы работы, полнее использовать разрушающую способность инструмента и расширять область его применения. Одним из достоинств методики является возможность ее применения как на стадии проектирования инструмента или горной машины, так и в процессе их эксплуатации. Кроме того, для выполнения расчетов достаточно в качестве исходных данных иметь характеристики механических свойств пород и инструмента.

Авторы выражают благодарность кандидатам техн. наук Ю. А. Черкашину, А. В. Касаточкину, К. Н. Захарову и Л. В. Стихову за ценные замечания по рукописи и инженерам В. Я. Лукиной, Ф. А. Ильиной, лаборантам Т. М. Стрельцовой, Э. Ф. Эстерле и Л. А. Гебгард за помощь, оказанную при подготовке рукописи.

## Глава 1

# НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

### § 1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Алмазные инструменты, применяемые в горной и камнеобрабатывающей промышленности, по конструктивным признакам разделяются на коронки, долота, диски, штрипсы, ленточные и канатные пилы. Все они армируются определенными разновидностями технических алмазов.

Условия применения алмазных коронок различны: от мягких осадочных до твердых изверженных и основных пород.

Алмазосодержащий слой в керновых или кольцевых коронках выполняется в виде сплошного или прерывистого кольца. Коронка со сплошным алмазосодержащим слоем (рис. 1, а) предназначена для бурения в умеренно абразивных породах. Она выполнена без промывочных каналов и имеет связку твердостью HRC 30...35 с алмазами зернистостью 25 шт./кар. Для разбуривания бетона и других строительных материалов применяют [31] тонкостенные кольцевые коронки, которые принято называть сверлами. Алмазосодержащий слой таких коронок выполняется прерывистым, т. е. состоит из отдельных сегментов (рис. 1, б).

Фирма «Кристенсен» [1] рекомендует для бурения мягких и средней крепости пород коронки, оснащенные сравнительно крупными алмазами — 7—15 шт./кар и двумя (рис. 1, в) или несколькими (рис. 1, г) промывочными каналами, что позволяет осуществлять эффективную очистку забоя в условиях значительного шламообразования.

В США при бурении двойными колонковыми трубами применяют коронки с внутренней резьбой (рис. 1, д, е), которые используют и при бурении геологоразведочных скважин с очисткой забоя сжатым воздухом или глинистым раствором. Коронка (рис. 1, д) имеет шесть каналов для прохода воздуха и глинистого раствора и армирована алмазами зернистостью 4 шт./кар. Твердость связки коронки равна HRC 30...35. Для разрушения песчаников и сланцев с продувкой воздухом рекомендуется коронка (рис. 1, е), которая отличается от предыдущей наличием большего числа промывочных каналов и несколько меньшей зернистостью алмазов — 7 шт./кар. Эта коронка имеет связку твердостью HRC 40...50, что позволяет эффективно использовать ее при разрушении абразивных пород.

Создание отечественных мелкоалмазных коронок началось в 1933—1934 гг., когда были изготовлены опытные литые коронки. Несколько позже разработкой способов изготовления буровых коронок занялся ряд научно-исследовательских институтов: ЦНИГРИ, ВНИИТС, ВИМС и др.



Рис. 1. Алмазные коронки для бурения фирмы «Кристенсен»

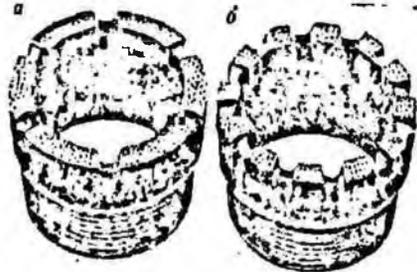


Рис. 2. Керновые коронки типа АКВ с шестью (а) и двенадцатью (б) промывочными каналами

нашей стране началось в 1945 г., причем как однослойные, так и многослойные коронки начиная с 1950 г. и по настоящее время выпускаются на основе связок из карбида вольфрама с отечественным алмазным сырьем применительно к породам с различными механическими свойствами.

В последние годы институтами ИСМ АН УССР, НИИАЛМАЗ и ВИТР разработаны новые типы связок и используются синтетические алмазы зернистостей 630/500, 500/400, 00/320 мкм [12, 23].

Однослойные алмазные буровые коронки изготавливаются с алмазами различных размеров и качества и связкой разных вердости и износостойкости. Мелкоалмазные коронки предназначены в основном для бурения пород VII—XI категорий буримости, при этом малоабразивные плотные породы предпочтительнее бурить коронками со связкой твердостью НРС 20...25; породы абразивные трещиноватые переменной твердости следует бурить коронками со связкой твердостью НРС 30...35. Однослойные коронки закладываются, как правило, высококачественные алмазы, потеря которых недопустима.

Мелкоалмазные многослойные коронки армируются двумя, тремя, пятью или шестью слоями алмазов и двумя-тремя слоями подрезных алмазов, сохраняющих диаметр скважины; изготавливаются из алмазов различных размеров и качества и имеют вязку различных твердости и износостойкости, их зернистость составляет 60—90 и 90—120 шт./кар и для подрезных алмазов — 20—30, 30—40 и 40—60 шт./кар.

Принцип работы многослойных коронок основан на способности рабочей поверхности самозатачиваться, т. е. по мере износа алмазов первого слоя в работу вступают алмазы второго слоя и т. д. Многослойные коронки используются в основном для бурения крепких пород IX—XI категорий. Практикой бурения установлено, что многослойные коронки до 60% продвки осуществляют своим первым слоем и до 40% — всеми остальными слоями, т. е. происходит нерациональное использование алмазов. Поэтому с точки зрения экономических соображений многослойные коронки с высококачественными алмазами целесообразно заменить однослойными, например АКВ (рис. 2), и импрегнированными коронками.

Первыми отечественными импрегнированными коронками были коронки ИМВ-1, ИМВ-2 и ИМВ-3. Эти коронки армируются рабочим слоем, который состоит из смеси объемных зерен с порошковой шихтой связки и двух-трех слоев подрезных алмазов, поддерживающих диаметр скважины. Алмазы в импрегнированных коронках распределены во всем объеме материала связки, и бурение ими ведется до полного износа рабочего слоя. Коронки типа ИМВ предназначены для кернового бурения пород XI—XII категорий сложных формаций. В настоящее время серийно выпускаются импрегнированные коронки 02ИЗ, 02И4, КАИ, БСИ. Последние два типа коронок отличаются более развитой системой промывочных канавок [23]. Импрегнированные коронки изготавливаются с алмазами нескольких зернистостей, различного качества и со связкой различных твердости и износостойкости. Зернистость объемных алмазов

120...150, 150...300, 300...400 шт./кар, а твердость связки составляет HRC 20...55. Армирование импрегнированного слоя коронки осуществляется в основном дроблеными алмазами, а подрезные алмазы устанавливаются высокого качества и овализованные. Как правило, в импрегнированные коронки в настоящее время закладываются алмазы невысокого качества, поэтому они не подлежат рекуперации и при бурении должны отработаться до конца.

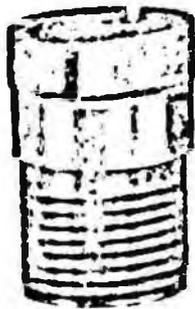


Рис. 3. Алмазная гранулированная коронка I АГК

В отечественных керновых коронках типа АКВ [10, 23] с заданным выпуском торцовых алмазов, расположенных в рабочей поверхности по концентрическим окружностям, достигнута максимальная насыщенность алмазами алмазосодержащего слоя. В результате зернистость алмазов составила 20-60 шт./кар, а эффективная область применения распространена на абразивные породы IX—XII категорий буримости. Коронки выполняются с шестью и двенадцатью промывочными каналами (см. рис. 2). Сравнительные испытания опытных коронки типа АКВ показали преимущества по сравнению с серийными коронками типа ПМВ.

Отечественная коронка I АГК (рис. 3) состоит из цилиндрического корпуса с резьбой и припаянных к нему твердосплавных брусков, насыщенных равномерно распределенными в объеме гранулированными алмазами. Они бывают четырех размеров по наружному диаметру слоя (76, 59, 46 и 36 мм) с массой алмазов 26 и 20 кар. Удельная насыщенность рабочего слоя алмазами в коронках всех диаметров одинакова и соответствует 100%-ной концентрации (0,878 г алмазов в каждом кубическом сантиметре рабочего слоя матрицы).

В гранулированные коронки устанавливаются недорогие алмазы зернистостью А630/500 (300—500 шт./кар), А800/630 (150—300 шт./кар), А1000/800 (90—150 шт./кар), А1250/1000 (60—90 шт./кар), повышение качества которых достигается специальной обработкой (дроблением, овализацией, металлизацией, гранулированием). Коронки I АГК, предназначенные для бурения пород IX—XI категорий, показали хорошую работоспособность и в породах других категорий [23]. В результате этого гранулированные коронки рекомендуются для бурения пород в широком диапазоне свойств (табл. 1).

Как видно из табл. 1, для пород VII категории рекомендуются коронки со сравнительно крупными алмазами зернистостью А1250/1000, для пород IX—X категорий с алмазами зернистостью

Таблица 1  
Область применения гранулированных коронки I АГК

Группы горных пород по абразивности	Группы горных пород по буримости			
	VII—IX		IX—XI	
	Зернистость, мкм (шт./кар)	Твердость связки HRC	Зернистость, мкм (шт./кар)	Твердость связки HRC
Малоабразивные	A1250/1000 (60—90)	20—25	A1000/800 (80—150)	20—25
Среднеабразивные	A1250/1000 (60—90)	30—35	A1000/800 (80—150)	30—35
Высокоабразивные	A1250/1000 (60—90)	40—50	A1000/800 (80—150)	40—50

Продолжение табл. 1

Группы горных пород по абразивности	Группы горных пород по буримости			
	X—XII			
	Зернистость, мкм (шт./кар)	Твердость связки HRC	Зернистость, мкм (шт./кар)	Твердость связки HRC
Малоабразивные	A800/630 (150—300)	20—25	A630/500 (300—500)	20—25
Среднеабразивные	A800/630 (150—300)	30—35	A630/500 (300—500)	30—35
Высокоабразивные	A800/630 (150—300)	40—50	A630/500 (300—500)	40—50

А1000/800 и, наконец, для бурения весьма твердых пород XI—XII категорий предназначены коронки с мелкими алмазами А800/630, А630/500. При этом связка по твердости может быть различной: мягкой М (HRC 20...25), средней С (HRC 25...40) и твердой Т (HRC 40...50).

Коронки I АГК могут армироваться овализованными алмазами; в зависимости от твердости связки, зернистости, степени овализации алмазов и назначения коронки бывает 48 марок. Индексы, характеризующие зернистость алмазов, степень овали-

зации последних и твердость связки, введены в маркировку коронок. Положительным качеством гранулированных коронок является их работоспособность до полного износа.

Таким образом, в настоящее время основной тенденцией в конструировании коронок является стремление максимально упростить форму и геометрию рабочей части, увеличить число промывочных каналов. Снижение стоимости инструмента достигается за счет использования низкосортных алмазов зернистостью А630/500—А1600/1250 и повышения их качества путем специальной дополнительной обработки сырья. Коронки, оснащенные мелкими алмазами, при прочих равных условиях имеют меньшую производительность. Повышение производи-



Рис. 4. Алмазные отрезные круги:

*a* — со сплошным алмазосодержащим слоем; *б, в* — соответственно с уменьшенным и нормальным расстоянием между сегментами

сти такого инструмента возможно благодаря увеличению скорости резания и интенсификации удаления продуктов разрушения из зоны контакта инструмента с породой с помощью так называемого агрегатированного алмазного бурового инструмента. Одним из вариантов агрегатированного инструмента является планетарная буровая головка из двух или более дисков, которые по периферии оснащены брусками с мелкими алмазами. Планетарная буровая головка предназначена для проходки шурфов и бурения скважин большого диаметра (250 мм и более).

Алмазные диски, применяемые для резания горных пород, отличаются разнообразием конструктивного исполнения, определяемого их назначением, физико-механическими свойствами разрушаемого материала, а также технологией изготовления.

Наиболее широкое распространение при добыче и обработке декоративного и отделочного камня в СССР [6] и за рубежом [33, 36] получили отрезные алмазные круги, представляющие собой металлический корпус с напаянным на него по периферии алмазосодержащим слоем. Причем алмазосодержащий слой может быть

выполнен сплошным или прерывистым — сегментным. Круги со сплошным алмазосносным слоем (рис. 4, а) выпускаются диаметром 50—320 мм. Применяются такие круги в основном для фрезерования гранитных, мраморных и других плит, а также для точной резки ценных разновидностей камней и полупроводниковых материалов (табл. 2).

Таблица 2

Основные размеры алмазных отрезных кругов со сплошным алмазосодержащим слоем

Размер круга, мм (см. рис. 4)				Масса алмазов при концентрации 25% кар	Размер круга, мм (см. рис. 4)				Масса алмазов при концентрации 25% кар
внешний диаметр D	ширина алмазосносного слоя b	высота алмазосносного слоя f	диаметр посадочного отверстия d		внешний диаметр D	ширина алмазосносного слоя b	высота алмазосносного слоя f	диаметр посадочного отверстия d	
50	0,15	2,5	12	0,06	100	0,45	5,0	20	0,74
50	0,18	2,5	12	0,07	125	0,30	5,0	32	0,62
75	0,25	2,5	12	0,16	125	0,45	5,0	32	0,93
80	0,30	5,0	12	0,30	160	0,70	5,0	32	1,90
90	0,30	5,0	12	0,44	200	1,20	5,0	32	4,00
90	0,45	5,0	12	0,66	320	2,00	5,0	32	11,00
100	0,30	5,0	20	0,49					

ВНИИАЛМАЗ рекомендует отрезные круги с нормальными межсегментными пазами (см. рис. 4, б, в), основные размеры которых приведены в табл. 3.

Толщину и материал корпусов алмазных отрезных кругов выбирают с учетом режимов резания с тем, чтобы обеспечивались необходимые жесткость и устойчивость при работе. При этом также должны обеспечиваться одновременное изнашивание алмазного слоя по высоте и толщине сегментов и предохранение корпуса от трения о боковые стенки прорезаемой щели. Толщина сегментов превышает толщину корпуса на 0,8—4 мм в зависимости от диаметра круга; высота сегментов 7—10 мм, а высота алмазного слоя 5—7 мм. Длина сегментов для кругов с узкими и нормальными пазами 40 мм диаметром 400—800 мм и 24 мм — для кругов диаметром 250—320 и 1000—3150 мм.

Крепятся сегменты к диску пайкой. Такой способ крепления, несмотря на простоту, имеет существенные недостатки. Во-первых, жесткое крепление увеличивает динамику разрушения, что неблагоприятно отражается на алмазных зернах, во-вторых, за-

Таблица 3

Основные размеры алмазных отрезных кругов с нормальными межсегментными пазами

внешний диаметр	Размер круга, мм				Число сегментов в круге	Содержание алмазов (кар) при концентрации	
	диаметр посадочного отверстия	ширина алмазного сегмента	длина алмазного сегмента	высота алмазного сегмента		25%	50%
250	32	2,6	24	7	24	8,2	16,5
320	32	3,0	24	7	30	12,0	24,0
320	32	3,8	24	7	30	15,0	30,0
400	32	3,2	40	7	24	17,0	34,0
500	90	3,8	40	7	30	25,0	50,0
680	90	4,2	40	7	36	33,0	66,0
800	90	5,5	40	7	43	58,0	116,0
1000	120	6,0	24	8	72	57,0	114,0
1100	120	6,5	24	8	78	67,0	134,0
1250	120	7,0	24	8	90	83,0	166,0
1400	120	7,5	24	8	90	89,0	178,0
1600	180	9,0	24	8	102	121,0	242,0
2000	180	10,0	24	10	126	232,0	465,0
2500	240	12,0	24	10	162	358,0	717,0
3150	240	14,0	24	10	204	526,0	1053,0

мена сегментов в случае их износа или поломок требует демонтажа всего рабочего органа и занимает много времени.

Важной характеристикой алмазного инструмента является связка, удерживающая алмазные зерна. Фирма «Диаман Бор» (Бельгия) [33] выделяет три типа горных пород с точки зрения механизма износа алмазного круга: мягкие и абразивные, средней крепости и крепкие. С точки зрения этой классификации механизм износа в первом случае состоит в быстром разрушении связки, во-втором — в разрушении связки и износе вершин алмазных зерен и в третьем случае — в быстром износе алмазов. Поэтому для абразивных пород (песчаник) фирма рекомендует твердую износостойкую связку, для пород средней крепости (мрамор) — связку средней твердости и для крепких пород (гранит) — мягкую связку. Рекомендации ученых нашей страны аналогичны [6, 12].

В связи с расширением области применения дискового инструмента увеличивается его специализация, видоизменяется конструкция режущей части, в отдельных видах работ возникает необходимость применения широких алмазных дисков. В зависимости от назначения широкие алмазные диски имеют различные геометрические размеры и характеристику режущей части. Так же как и отрезные круги, широкие алмазные диски могут иметь как сплошной алмазоносный слой, так и сегментный.

Фирмой «Кристенсен» (Франция) разработана конструкция широких алмазных дисков (рис. 5), армированных крупными алмазами (до 2—3 мм в диаметре), которые образуют правильные ряды, расположенные в радиальных плоскостях. Режущая поверхность дисков разделена специальными каналами на отдельные сегменты. Каналы облегчают вынос продуктов разрушения из зоны резания. Ширина прорезаемой канавки за счет увеличенной ширины режущей кромки дисков достигает 30—40 мм.

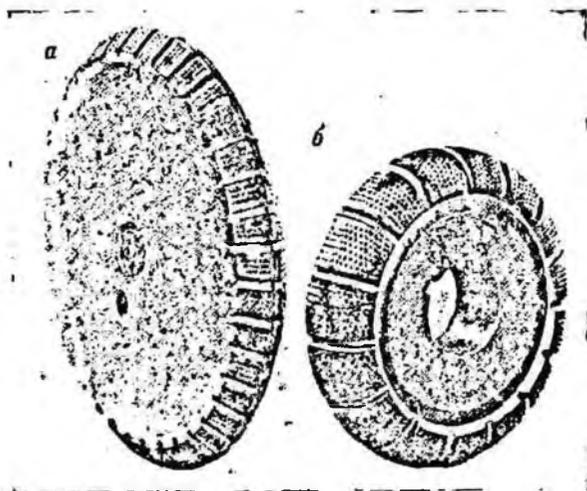


Рис. 5. Алмазные диски фирмы «Кристенсен»: а — составной из двух частей; б — со скругленной режущей частью

Для фрезерования крепких пород фирма «Кристенсен» предлагает сборный диск (рис. 6, а), оснащенный импрегнированными алмазными сегментами. Диск состоит из двух одинаковых половин, каждая из которых снабжена оправками с напаянными на них сегментами. Причем сегменты расположены на периферийной поверхности параллельно оси вращения диска в шахматном порядке. При износе диска наружные торцы сегментов округляются и эффективность работы инструмента снижается, но срок службы такого диска можно продлить, помняв местами его половины, так что с наружной стороны окажутся еще не изношенными торцы сегментов.

Недостатком такого диска является низкая устойчивость алмазных сегментов при повышенных тангенциальных нагрузках, что может привести к отрыву их от оправок в месте пайки. Более удачно расположены сегменты на режущей поверхности в диске конструкции фирмы «Диаман Бор» (рис. 6, б). В этом диске, также состоящем из двух половин, сегменты расположены

в елочку, что повышает их устойчивость. Диски такой конструкции изготавливаются диаметром 350—500 мм и толщиной 35 мм [33] и используются для профильного фрезерования пород различной крепости.

В последнее время все более широкое развитие получают работы, связанные с изысканием рациональной конструкции комбинированной рабочей поверхности инструмента. При этом

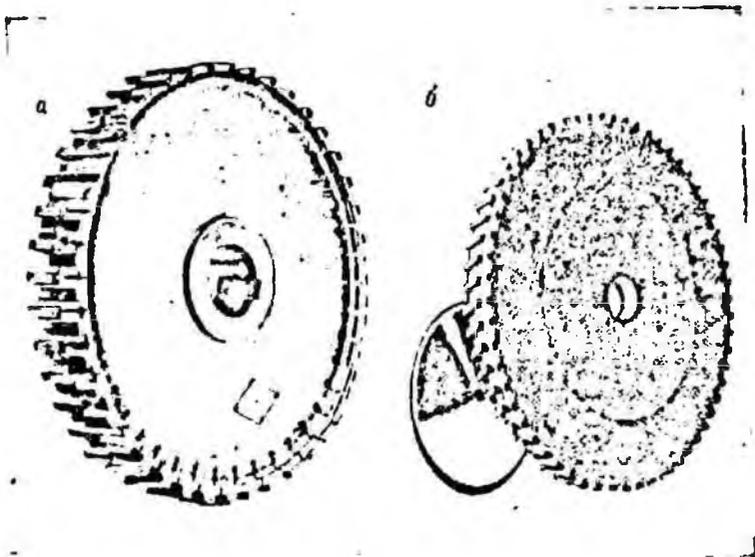


Рис. 6. Алмазные импрегнированные диски с разъемными половинками

основными направлениями совершенствования комбинированных алмазных дисков являются снижение удельных затрат энергии на разрушение и уменьшение расхода алмазов на единицу разрушенного объема породы.

Карагандинским политехническим институтом для использования в исполнительном органе породопроходческого комбайна, работающего по принципу прорезания алмазным диском щелей в массиве, параллельных забою, с последующим отделением надщелевых целников породы отрывом, разработаны специальные конструкции алмазных дисков [17, 26].

Для обеспечения устойчивой работы исполнительного органа комбайна при дуговой подаче корпус диска выполнен сферическим (рис. 7), что устраняет трение корпуса диска о стенки щели. Ширина режущей кромки диска составляет 30—40 мм и определяется из условия размещения тарельчатого отрывника в специальной проточке диска. Для повышения прочности ал-

мазных сегментов и надежности закрепления на корпусе диска их габариты увеличены и составляют: длина 30 мм, ширина 15 мм, высота 10 мм. Диаметр дисков 600—800 мм. Оптимальной характеристикой таких дисков при разрушении абразивных пород средней крепости является следующая: зернистость алмазов А630/500—А800/630; концентрация алмазов 50% и связка М50 на основе твердого сплава ВК-10 твердостью НРС 30...40.

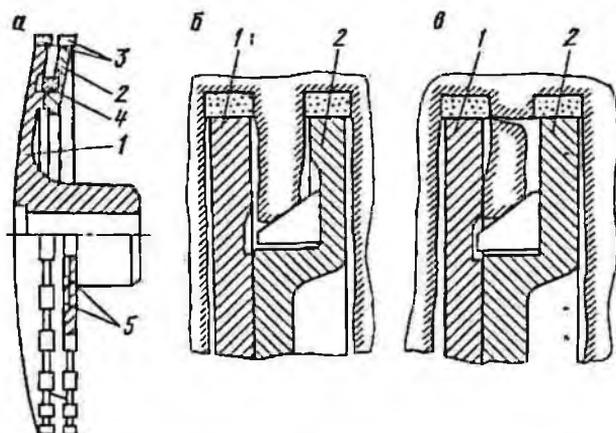


Рис. 7. Сферический диск со свободно вращающимся кольцевым скальвателем:

а — в сборе; б — при зарубке; в — при скальвании челичка породы; 1, 2 — алмазные диски; 3 — алмазные сегменты; 4 — кольцо; 5 — скошенные выступы

Другой особенностью конструкции этого алмазного диска является наличие свободно вращающихся кольцевых скальвателей. Между алмазными сегментами образуется зазор, ширина которого составляет около трети общей ширины режущей поверхности. Исследования работы диска [19] показали, что при его заглаблении между сегментами образуется породный челичок, который надавливает на свободно вращающийся кольцевой скальватель. Под действием усилия со стороны челичка породы кольцо сдвигается влево и отделяет породный челичок. В левом исходном положении кольцо размещается в кольцевой проточке диска. При дальнейшем заглаблении диска в массив вновь образующийся челичок, надавливая на скошенную поверхность кольца, отодвигает его вправо, и процесс скальвания челичка повторяется автоматически.

Возможна другая конструкция алмазного комбинированного диска, когда между алмазными сегментами устанавливаются резцы, армированные твердосплавными или алмазными пластинками, в зависимости от абразивности разрушаемого материала. Число резцов в одной линии резания принято минимальным с целью повышения эффекта силового резания. Ал-

мазные сегменты, напаянные на специальные оправки по периферии корпуса диска, прорезают в щели узкие канавки с образованием между ними целиков породы. Оконтуренные с трех сторон и ослабленные целочки породы разрушаются резцом, при этом площадь, разрушаемая алмазными сегментами, уменьшается на 30—40% в зависимости от числа прорезаемых канавок, что приводит к снижению удельных затрат энергии на разрушение.

Алмазные пилы, успешно применяющиеся для добычи и обработки горных пород, имеют следующие конструктивные разновидности: штрипсовые, канатные и ленточные. Основным преимуществом алмазных пил перед алмазными дисками является отсутствие для пил ограничений по глубине пропила, в то время как для диска этот параметр зависит от диаметра. Существенным недостатком пил по сравнению с дисками является значительно меньшая производительность разрушения.

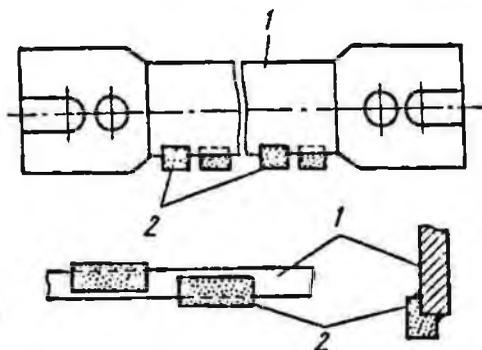


Рис. 8. Штрипса, оснащенная алмазными брусками:

1 — корпус пилы; 2 — алмазные бруски

В камнеобрабатывающей промышленности для разрезания породных блоков на плиты получили распространение штрипсы (рис. 8). Габариты штрипса, площадь сечения полотна и марка стали для полотна выбираются в зависимости от их назначения. При выборе характеристики алмазных

брусков руководствуются теми же соображениями, что и для алмазных сегментов. Отличие состоит в том, что, поскольку скорость резания у штрипсы значительно меньшая, появляется возможность увеличить зернистость алмазов.

Концы штрипсы крепятся в раме станка, и каждая пила натягивается для придания ей большей устойчивости в процессе разрушения горных пород. Алмазные бруски имеют ширину, несколько большую ширины корпуса, либо они напаяются вразбежку, что снижает боковое трение инструмента и облегчает вынос породного шлама.

За рубежом [33] для улучшения условий работы алмазной штрипсы предложена ее конструкция, выполненная в двух вариантах. В первом варианте (рис. 9, а) на периферийной части полого корпуса крепятся бруски, состоящие из рабочего участка, оснащенного алмазами и осуществляющего процесс резания, и безалмазного участка, подчищающего забой и удаляющего породный шлам. Для промывки рабочей зоны вода посту-

Лает под давлённем из отверстий, расположенных между алмазным и безалмазным участками бруска, и, вынося шлам, поднимается вверх по боковым поверхностям корпуса пилы.

В другом варианте (рис. 9, б) сплошной корпус оснащен безалмазными и алмазными брусками, закрепленными с помощью эллипсообразных пластинок, расположенных по обе стороны полотна. Со стороны штрипсы, откуда в щель подается промывочная жидкость, пластинки соединяют однотипные участки бруска, а со стороны, где жидкость со шламом вытекает из щели и находится под низким давлением, пластинки соединяют разнотипные участки бруска. Благодаря такой конструкции промывочные каналы постоянно находятся между подчищающими и рабочими брусками, т. е. при любом направлении движения

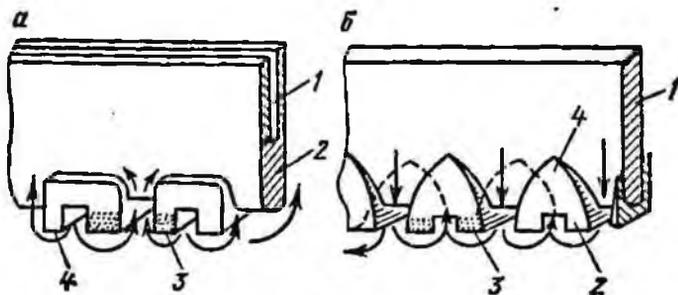


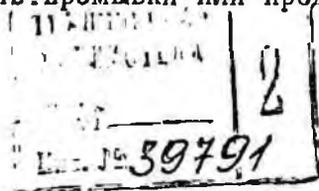
Рис. 9. Штрипсы с улучшенной системой промывки:

а — 1 — корпус; 2 — периферийная часть; 3 — рабочий участок бруска; 4 — безалмазный участок бруска; б — 1 — корпус; 2 — безалмазные бруска; 3 — алмазные бруска; 4 — эллипсообразные пластинки

инструмента обеспечиваются эффективная промывка и удаление шлама из рабочей зоны.

Рассмотренные конструкции алмазного породоразрушающего инструмента не исчерпывают всего их многообразия, но позволяют выявить общие особенности и основные направления работ по его совершенствованию.

В каждом инструменте имеются корпус и алмазосодержащая часть, образующая рабочую поверхность. Форма и геометрия корпуса зависят от конструкции рабочей поверхности и способа соединения с трансмиссией или приводом. Основная задача при конструировании корпуса — обеспечение прочности и технологичности при изготовлении. Алмазосодержащая часть формируется в зависимости от кинематики разрушения и должна обеспечивать полную отработку забоя алмазными зернами. Конструкторы стремятся максимально упростить форму рабочей поверхности с мелкими алмазными зернами, увеличить долговечность за счет рациональной геометрии, обеспечить высокую эффективность промывки или продувки зоны разруше-



ния, что снижает температуру резания и увеличивает производительность разрушения. Перспективным представляется применение комбинированного инструмента, разрушающего породу алмазными сегментами в сочетании с другими видами инструментов.

## § 2. СХЕМЫ ОБРАБОТКИ И РАЗРУШЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА

Алмазный инструмент используется для бурения взрывных, разведочных, вспомогательных и эксплуатационных скважин и шпуров, добычи и обработки природного камня, проведения подготовительных горных выработок, проходки туннелей, при строительстве дорог, гидротехнических и других сооружений. Все эти производственные процессы характеризуются определенными особенностями, от которых во многом зависит целесообразная схема разрушения. Эти особенности формируют требования, предъявляемые к работе алмазного инструмента. Так, при бурении не только необходимо получать скважины и шпуров различных диаметра и глубины, но и саму скважину получать сплошным разрушением или выбуриванием керна с периодическим его скалыванием. Добыча камня сопровождается вырезанием из массива блоков или плит с определенным качеством их поверхности, а подземные выработки могут быть круглыми, арочными, трапециевидными или прямоугольными. С другой стороны, использование алмазного инструмента должно характеризоваться высокими эксплуатационными показателями, на которые также влияет схема разрушения.

Схемы по принципу разрушения массива делятся на сплошную, с вырезанием блоков и комбинированную. Сплошная схема характеризуется отделением породы с поверхности массива по всей площади забоя под действием алмазных зерен. Продуктами разрушения является измельченная горная масса. Вырезание блоков осуществляется прорезанием в массиве узких щелей, обеспечивающих отделение от забоя блоков породы. Продуктами разрушения в этом случае являются мелкие фракции, образующиеся при прорезании щелей, и крупные блоки породы правильной геометрической формы. Комбинированная схема кроме алмазного резания предполагает использование и других механических или физических способов разрушения. В этой схеме применяются сплошное разрушение скважин или щелей и отделение междускважинных или междущелевых целиков ударом, отрывом, воздействием токов высокой частоты и другими способами. Скважины и щели в комбинированной схеме играют роль концентраторов напряжений. Продукты разрушения получают аналогичными, как и при схеме вырезания блоков, но крупные фракции не имеют правильной геометрии.

Широкую область применения получила сплошная схема разрушения, которая реализуется при бурении взрывных и эксплуатационных скважин и осуществляется алмазными инструментами различной конструкции. Сплошная схема разрушения отличается простотой процесса, с помощью которого она реализуется. Рабочая поверхность инструмента оснащена алмазными зернами, которые расположены таким образом, что при одновременном вращательном и поступательном движениях поверхность забоя полностью поражается инструментом. Исполнительный орган, обеспечивающий инструменту вращательное и поступательное движения, отличается простотой и надежностью, а вынос продуктов разрушения осуществляется водой, глинистым раствором или продувкой воздухом. Геометрия инструмента сплошного разрушения определяет форму забоя: выпуклую, плоскую, вогнутую и ступенчатую. В нашей стране наибольшее распространение получили первые две формы забоя. Сплошная схема позволяет вести непрерывное разрушение забоя до полного износа инструмента, что обеспечивает высокую производительность за счет сокращения времени на подготовительные и вспомогательные операции.

К недостаткам сплошной схемы относятся высокие удельные энергозатраты процесса из-за значительного измельчения продуктов разрушения. Так, при удельных энергозатратах на разрушение при алмазном бурении, составляющих 720—1080 МДж/м<sup>3</sup>, для проходки скважины диаметром 200 мм со скоростью  $3,3 \cdot 10^{-3}$  м/с требуется привод мощностью 80—120 кДж/с. При заданной мощности привода повысить производительность бурения можно благодаря использованию более крупных алмазных зерен, изменению конструкции инструмента, обеспечивающей снижение непроизводительных затрат на трение, и лучшему удалению продуктов разрушения из зоны контакта инструмента с породой. Применение в инструменте более крупных алмазов значительно повышает его стоимость, а производительность разрушения увеличивается при этом в меньшей степени [8], что влияет на его экономические показатели. Для различных горных пород форма и геометрия рабочей поверхности инструмента различны. Если для твердых и плотных пород средней абразивности более эффективен инструмент, образующий выпуклую форму забоя, то для пористых и трещиноватых лучшие результаты получены при вогнутой форме забоя. Инструменты, создающие плоскую и ступенчатую поверхность забоя, удовлетворительно работают по породам средней крепости с использованием относительно мелких алмазов. Способ подвода промывочной жидкости и интенсивность ее подачи в зону разрушения существенно влияют на производительность инструмента, но при прочих равных условиях лучшие результаты получены для инструмента, образующего забой выпуклой формы.

Большим резервом повышения производительности разрушения является увеличение скорости резания. Аналитически и экспериментально доказано [6, 26], что производительность алмазного разрушения прямо пропорциональна скорости резания. Для существующих инструментов сплошного разрушения прирост производительности за счет увеличения скорости резания ограничен прочностью алмазов в центре долота, где скорости резания минимальны и алмазные зерна в основном производят раздавливание породы под действием силы подачи, и жесткостью бурового става, которая по мере заглубления инструмента в массив снижается и вызывает рост динамических нагрузок на алмазы. Устранить эти недостатки можно созданием конструкции с планетарным движением породоразрушающих элементов и расположением привода в непосредственной близости от инструмента. Но, так как рост скорости резания требует пропорционального увеличения мощности привода, расположение последнего в стесненных условиях скважины вызывает серьезные затруднения в создании исполнительного органа. Обеспечение планетарного движения породоразрушающих элементов требует применения специального редуктора, что снижает надежность исполнительного органа.

Перспектива повышения энерговооруженности инструмента и снижения его стоимости за счет применения низкосортных алмазов зернистостью А500/400—А1000/800 подтверждает целесообразность совершенствования машин, работающих по сплошной схеме разрушения забоя.

Расчеты показывают, что сплошная схема при бурении взрывных и эксплуатационных скважин, несмотря на значительные затраты на износ инструмента и энергию, остается в отдельных случаях эффективной и даже единственно возможной. В то же время при проведении подготовительных и транспортных горных выработок, сечение которых колеблется от 4 до 100 м<sup>2</sup>, такая схема не приемлема. Объясняется это в первую очередь высокими затратами на инструмент и требуемой для достижения производительности установки привода слишком большой мощности. В связи с относительно низкими потерями на трение в трансмиссии и инструмента о стенки выработки и лучшими условиями выноса продуктов разрушения удельные затраты энергии процесса ниже, чем при бурении, и составляют для пород с коэффициентом крепости  $f=4\div 12$  по шкале проф. М. М. Протодьяконова 144—540 МДж/м<sup>3</sup> [26]. Так, для проведения по таким породам выработок сечением 10 м<sup>2</sup> со скоростью  $0,56 \cdot 10^{-3}$  м/с мощность привода исполнительного органа породопроходческого комбайна составит 800—2500 кДж/с. Поэтому в этих условиях более перспективным является реализация схемы вырезания блоков или комбинированная.

Схема вырезания блоков наибольшее распространение получила при добыче строительного камня из карьеров [6, 7, 26].

По этой схеме представляется возможность получать непосредственно из забоя полуфабрикат или готовые изделия, что повышает культуру производства, безопасность работ и снижает себестоимость продукции. Вырезание блоков применяется при добыче мрамора, известняка, туфа и других разновидностей декоративного и отделочного камня. Процесс добычи камня заключается в оформлении забоя в виде уступов, на которых алмазным инструментом нарезаются вертикальные и горизонтальные щели, полностью отделяющие от массива единичные блоки породы. Нарезание щелей производится дисковыми, полосовыми или канатными пилами, при этом используют комплекс оборудования с независимыми исполнительными органами для нарезания вертикальных и горизонтальных щелей и погрузочно-транспортующие механизмы.

При благоприятных горно-геологических условиях разработку ведут сразу несколькими уступами, применяя высокопроизводительную поточную технологию.

Энергозатраты на разрушение по схеме вырезания блоков на 90% складываются из затрат на прорезание щелей, объем которых, по сравнению с объемом вырезанного блока, незначителен. Так, при ширине щели 15 мм и размерах блока 500×500×1000 мм объем щелей для оконтуривания блока с трех сторон составляет 8% объема блока. Следовательно, общие затраты энергии на разрушение массива в 10—15 раз меньше, чем при сплошном разрушении, и соответственно ниже затраты, связанные с износом инструмента. Это позволяет с высокой эффективностью использовать алмазный породоразрушающий инструмент. Производительность последнего зависит от назначения вырезаемого блока: если заготовка предназначена для распиловки на более мелкие блоки-изделия с последующей шлифовкой поверхности, то резание можно производить с большей производительностью, тогда как при вырезании из массива готовых изделий производительность алмазного разрушения преднамеренно снижается с целью получения практически шлифованных поверхностей.

Схема вырезания блоков применима не только в условиях открытых карьеров, но и на подземных разработках. Для получения блоков прямоугольной формы в этом случае необходимо иметь специальную нишу для заводки инструмента, осуществляющего срезание блоков, оконтуренных горизонтальными и вертикальными щелями, перпендикулярными к плоскости забоя. При проходке подготовительных горных выработок и транспортных туннелей, когда не предусматривается получение блоков прямоугольной формы, алмазным инструментом осуществляется разрушение по схемам вырезания блоков (рис. 10 и 11). Согласно рис. 10 предварительно нарезаются горизонтальные щели, а затем под углом к плоскости забоя одновременно или поочередно вертикальные щели таким образом, что-

бы их плоскости попарно пересекались, что обеспечивает отделение от массива блоков породы в виде ромбических параллелепипедов.

По схеме, показанной на рис. 11, осуществляется разрушение забоя вырезанием блоков с образованием уступа; аналогично предыдущей схеме нарезаются горизонтальные и вертикальные щели, но те и другие делаются перпендикулярными к плоскости забоя. Блоки срезаются исполнительным органом таким образом, чтобы плоскость резания инструмента составляла с плоскостью забоя некоторый угол, который обеспечит отделение слоя породы при перемещении инструмента в направлении скорости подачи. Если толщина срезаемого слоя не превосходит глубины прорезанных горизонтальных и вертикальных щелей, то блоки отделяются также в виде ромбических параллелепипедов. После срезания одного или нескольких слоев, расчлененных горизонтальными и вертикальными щелями, при одном и том же угле наклона плоскости резания алмазного инструмента

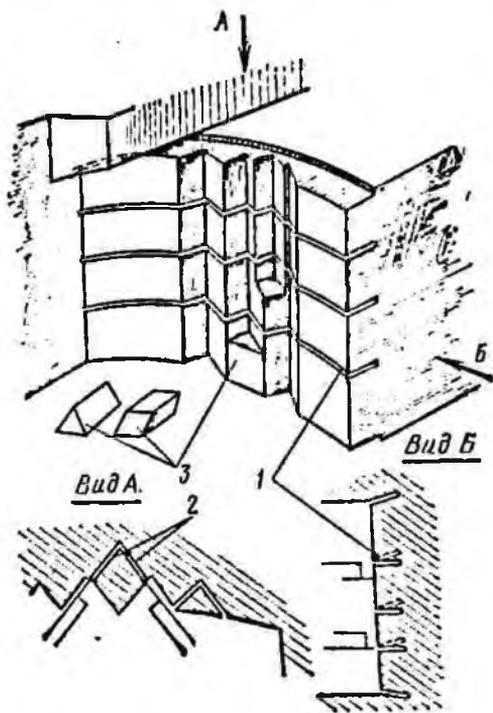


Рис. 10. Вырезание блоков с забоя без уступа:

1, 2 — соответственно горизонтальные и вертикальные щели; 3 — вырезанные блоки породы

на поверхности забоя образуется уступ, который дает возможность отделять блоки породы поочередно с левой и правой поверхностей забоя. В рассмотренном случае линия пересечения этих поверхностей вертикальная, хотя она может быть наклонена и под некоторым углом к вертикали.

Образование горизонтальных и вертикальных щелей и отделение блоков от массива выполняются дисковым инструментом или полосовыми пилами. При использовании пил, совершающих возвратно-поступательное движение, их траектория выбирается таким образом, чтобы на всем пути контакта инструмента с забоем не было участков, где скорость резания равнялась нулю, а скорость подачи была бы перпендикулярной к направлению скорости резания. В противном случае алмазные

зерна разрушают забой не резанием, а раздавливанием, что нарушает нормальные условия работы инструмента. Число инструментов, одновременно участвующих в работе, зависит от площади забоя, расстояния между щелями и условий необходимой маневренности исполнительного органа. Схема разрушения за-

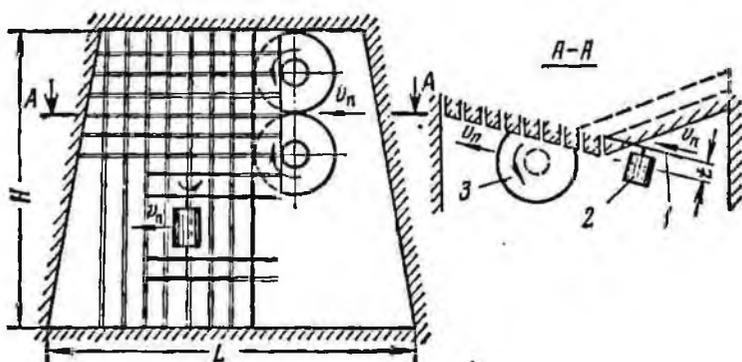


Рис. 11. Вырезание блоков с образованием уступа забоя:  
1, 2 — вертикальные и горизонтальные щели; 3 — исполнительный орган

боя (см. рис. 11) позволяет использовать одновременно необходимое число инструментов для нарезания горизонтальных щелей по всему сечению забоя, тогда как вертикальные щели, плоскости которых должны взаимно пересекаться, нельзя нарезать одновременно. Другая схема (см. рис. 10) также позволяет применять четыре, как показано на рисунке, или больше инструментов для нарезания горизонтальных и вертикальных щелей, но срезание блоков может выполняться ограниченным числом дисковых или полосовых пил, что в данном случае обусловлено площадью забоя и его геометрией.

Описанная технология разрушения применима не только для обработки забоя прямоугольной и трапециевидальной форм, но также круглой и арочной. Для получения забоя круглой и арочной форм требуется более сложная траектория движения инструмента при операции срезания блоков. В связи с тем, что движение инструмента плоско-параллельное, в рассмотренных схемах применяются плоские диски и пилы. Возможно также использование канатов и цепей, армированных алмазами. Высокие скорость резания и энерговооруженность, свойственные дисковому инструменту, позволяют создать маневренные с низкой удельной металлоемкостью исполнительные органы, которые широко применяются при добыче блоков камня из карьеров. Увеличение числа инструментов повышает производительность разрушения, но снижает маневренность исполнительного органа.

В глухих забоях сложно совместить операции по нарезке горизонтальных, вертикальных щелей и срезке блоков, а последовательное их выполнение неизбежно увеличивает время, затрачиваемое на маневрирование, что снижает производительность разрушения. Если требуемая производительность обеспечивается, то применение алмазного инструмента в схеме вырезания блоков является достаточно эффективным за счет малого объема породы, разрушаемой алмазами, что определяет низкие удельные износ алмазов и энергозатраты на отделение. Схемы вырезания блоков целесообразно применять в глухих забоях при добыче ценных полезных ископаемых в виде блоков правильной геометрической формы или при проведении выработок по породам высокой крепости. Расстояние между щелями и их глубина определяются требованиями к размерам блоков или возможностями погрузочно-транспортных средств.

Более производительна и эффективно, особенно для пород средней крепости и крепких, использование алмазного инструмента в сочетании с другими способами разрушения. Наибольшее распространение из них получили взрывной, статический, динамический и отделение породы от массива отрывом. В общем случае механизм разрушения при отделении крупных элементов породы характеризуется появлением трещин от растягивающих нагрузок. Поэтому при комбинированном разрушении отделение породы от массива происходит за счет отрыва [17, 26], хотя характер приложения нагрузки и ее направление могут быть различными.

Для разрушения уступа, ослабленного скважинами, в последние загружают взрывчатое вещество или вставляют механические клинья. При взрывании заряда или воздействии клиньев на стенки скважин происходит отрыв блоков породы от массива. При расположении скважин на некотором расстоянии друг от друга вдоль уступа трещины отрыва могут объединяться, отделяя более крупные блоки породы. Такая технология отделения породы является наиболее широко распространенным комбинированным способом разрушения, применяющимся при добыче полезных ископаемых, строительстве наземных и подземных сооружений и проходке горных выработок. Распространенность этого способа во многом определяется простотой применяемого оборудования, высокой универсальностью в отношении горно-геологических условий. Специфика разрушения определяет и его порядок, заключающийся в бурении шпуров или скважин, последующей их зарядке взрывчатым веществом или установке клиньев, а затем производстве взрывания и разрушения междускважинных или межшпуровых целиков породы. Наиболее трудоемкой операцией в этом комплексе работ является бурение шпуров или скважин.

Для улучшения эксплуатационных показателей бурения, выражающихся в снижении энергетических затрат на бурение и

износа инструмента, применяют комбинированное разрушение забоя скважины или шпура, при котором меньшая часть объема породы разрушается под воздействием алмазных зерен, а остальной объем отделяется другим способом. Наиболее просто это достигается прорезанием в забое концентрических щелей с периодическим скальванием междущелевых целиков с помощью механических скальвателей. Число концентрических щелей в забое может быть различным. При образовании одной оконтуривающей щели в центре образуется породный керн. Возможен вариант получения забоя с образованием центрального отверстия и двух концентрических щелей. В связи с тем, что в первом случае конструкция инструмента более простая и объем породы, разрушаемой алмазными зернами, меньший, она получила большое распространение. Другой причиной распространения кернового бурения в геологоразведочных работах является необходимость получения образцов породы для их последующего анализа, что наиболее просто выполняется периодическим подъемом инструмента и извлечением из его центральной части породного керна.

Схема с центральным отверстием и несколькими концентрическими щелями более приемлема при бурении скважин большого диаметра и проведении горных выработок круглого сечения. Конструктивно в этом случае имеется возможность создания алмазного инструмента, объем разрушения которым составляет несколько процентов от общего объема, со специальными устройствами для разрушения междущелевых целиков. Комбинированная схема разрушения применяется для образования в подземной горной выработке опережающей скважины, предназначенной для дегазации, осушения или используемой как технологическая ниша для размещения инструмента, осуществляющего дальнейшую обработку забоя горной выработки, и других операций. Нагрузка для разрушения междущелевых целиков может быть как статической, так и динамической, как непрерывной, так и периодической. Механическое разрушающее воздействие в этом случае прикладывается к вогнутой поверхности междущелевого целика.

Комбинированный буроскальвающий способ разрушения по сравнению со сплошной схемой отличается более низкими затратами энергии на разрушение и меньшим удельным износом инструмента. Но конструкция инструмента усложняется, появляются дополнительные нерабочие трущиеся поверхности.

Как на открытых горных работах, так и при проведении подземных выработок большой интерес представляет применение комбинированных схем разрушения, в которых одновременно или последовательно с прорезанием щели алмазным инструментом междущелевой или надщелевой целик разрушается специальными отрывниками или ударниками. На рис. 12, а представлена схема, по которой разрушение надщелевого целика

осуществляется отрывником, который заводится в предварительно прорезанную щель. Направление действия силы  $F_{от}$ , разрушающей целик, таково, что отделение породы происходит под действием растягивающих напряжений, что в несколько раз снижает необходимое усилие [24, 26]. Отрывник, расположенный в щели, воздействует на целик периодически и перемещается вдоль щели либо после прорезания щели. Сила отрыва зависит от размеров целика и от механических свойств породы

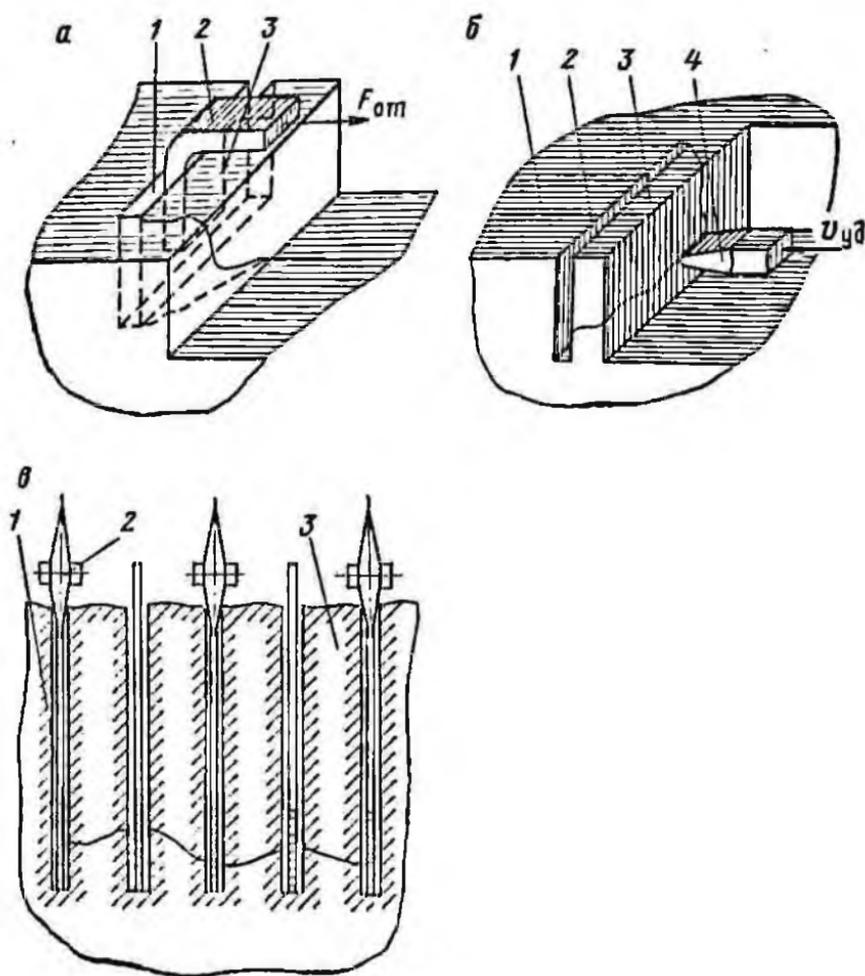


Рис. 12. Комбинированное разрушение:

а — отрывником: 1 — щель; 2 — отрывник; 3 — целик породы; б — ударником: 1 — породный массив; 2 — щель; 3 — целик породы; 4 — ударник; в — клиновыми роликами: 1 — алмазные пилы; 2 — клиновые ролики; 3 — междущелевые целики

Отделение надщелевого целика может осуществляться ударом в направлении, перпендикулярном к плоскости щели

(рис. 12, б). В месте приложения динамической нагрузки образуются трещины отрыва, отделяющие блок породы. Энергия удара, необходимая для разрушения, зависит от геометрических размеров целика, механических свойств породы, формы и геометрии ударного инструмента. Исследования [26] показали, что трещина отрыва всегда образуется в зоне приложения ударной нагрузки, поэтому удар следует наносить по линии дна прорезанной щели.

Наличие мощных пневмогидравлических ударных устройств [26] позволяет эффективно разрушать хрупкие породы высокой крепости. Для обеспечения устойчивой работы алмазного инструмента вследствие динамичности процесса разрушения режущий и скалывающий инструменты не должны иметь общей жесткой базы.

При отделении междущелевого целика клиновыми роликами последние заводятся в предварительно прорезанную алмазным инструментом щель (рис. 12, в). Ролик, прокатываясь вдоль щели, действует как клин на боковые поверхности междущелевых целиков и деформирует их. Максимальные растягивающие напряжения концентрируются у дна щели, где чаще и образуется трещина отрыва, отделяющая целик от массива. Клиновые ролики могут располагаться в щели через одну (см. рис. 12, в) или в каждой, но тогда они должны быть смещены относительно друг друга в плоскости простирания междущелевых целиков, чтобы исключить одновременную и противоположно направленную деформацию целика параллельно перемещающимся роликам.

Разрушающая нагрузка на целики может носить как статический, так и динамический характер. При использовании алмазных полосовых пил прорезаются одновременно несколько щелей на большую глубину при одновременном разрушении целиков. Разрушающая нагрузка может прикладываться и к средней части целика, производя его раздавливание, причем в этом случае щели не являются концентраторами напряжений, а лишь производят дополнительное обнажение массива, облегчая его разрушение.

Рассмотренные схемы разрушения являются наиболее простыми и сравнительно легко реализуются с помощью исполнительных органов породоразрушающих машин, оснащенных алмазным инструментом. Исполнительные органы, разрушающие массив по комбинированной схеме разрушения, отличаются большой производительностью и малой удельной энергоемкостью, которую можно определить из выражения

$$H_{\text{воб}} = \frac{10^{-6} (N_p + N_u)}{H_{\text{вн}} (B_{\text{щ}} + B_{\text{ц}})} = \frac{H_{\text{вп}}}{1 + \frac{B_{\text{ц}}}{B_{\text{щ}}}} + \frac{H_{\text{вн}}}{1 + \frac{B_{\text{щ}}}{B_{\text{ц}}}} \quad (1)$$

где  $N_p$  — мощность, необходимая на прорезание щелей, Вт;  $N_u$  — мощность, необходимая на разрушение междущелевых целиков, Вт;  $H$  — глубина щели, м;  $v_n$  — скорость подачи при прорезании щелей, м/с;  $B_{щ}$  — ширина щели, м;  $B_{ц}$  — толщина междущелевого целика, м;  $H_{\text{вр}}$  — удельные затраты энергии на разрушение при прорезании щелей, МДж/м<sup>3</sup>;  $H_{\text{вц}}$  — удельные затраты энергии на разрушение междущелевого целика, МДж/м<sup>3</sup>.

Исследования [19, 26] показали, что в зависимости от режимов резания удельные затраты энергии на разрушение алмазными дисками каратагинских песчаников колеблются от 180 до 1080 МДж/м<sup>3</sup>, а удельные затраты энергии на отделение междущелевых целиков ударом или отрывом составляют 0,22—2,2 МДж/м<sup>3</sup>. Следовательно, они примерно в 50 раз меньше удельных затрат энергии ударного разрушения массива и в 500 раз меньше алмазного. Так как в комбинированных схемах на долю алмазного разрушения приходится 5—10% объема отделяемой породы, то сочетание двух способов разрушения позволяет обеспечить его высокую эффективность. При разрушении междущелевых целиков толщиной 200 мм и глубиной щели 300 мм с помощью удара удельные энергозатраты на разрушение составляют 10,8—21,6 МДж/м<sup>3</sup> и исполнительным органом мощностью 20 кДж/с достигается производительность 40—70 м<sup>3</sup>/ч непрерывной работы.

Из формулы (1) видно, что производительность комбинированного разрушения можно существенно увеличить уменьшением ширины щели, прорезаемой алмазным инструментом, или увеличением толщины междущелевого целика. Сравнение энергозатрат на разрушение алмазным резанием и отрывом целика позволяет отдать предпочтение комбинированному разрушению по сравнению с другими схемами. Но при комбинированной схеме невозможно получить блоки породы правильной формы со стабильными размерами, поэтому эта схема применяется для добычи руд, балласта и при проведении подземных горных работ.

В настоящее время общепризнана целесообразность выполнения проходческих работ с помощью комбайнов, что позволяет устранить недостатки, присущие буровзрывному способу. Высокие удельные энергозатраты на разрушение пород алмазным инструментом не позволяют реализовать сплошную схему разрушения с помощью проходческого комбайна, так как для обеспечения необходимой производительности энерговооруженность исполнительного органа должна быть не ниже 1000 кДж/с. Естественно, столь большая потребная мощность исполнительного органа вызовет трудности при конструировании комбайна, который неизбежно окажется громоздким, будет отличаться низкой маневренностью.

Рассмотренные выше схемы разрушения забоя вырезанием блоков указывают на возможность создания исполнительного органа комбайна с этой целью. Но из анализа схем видна многооперационность отделения породы и связанная с этим производительность разрушения, сложность конструкции комбайна и системы управления. Более предпочтительной при проходке подземных горных выработок является комбинированная схема разрушения забоя, которая в сравнении со схемой вырезания

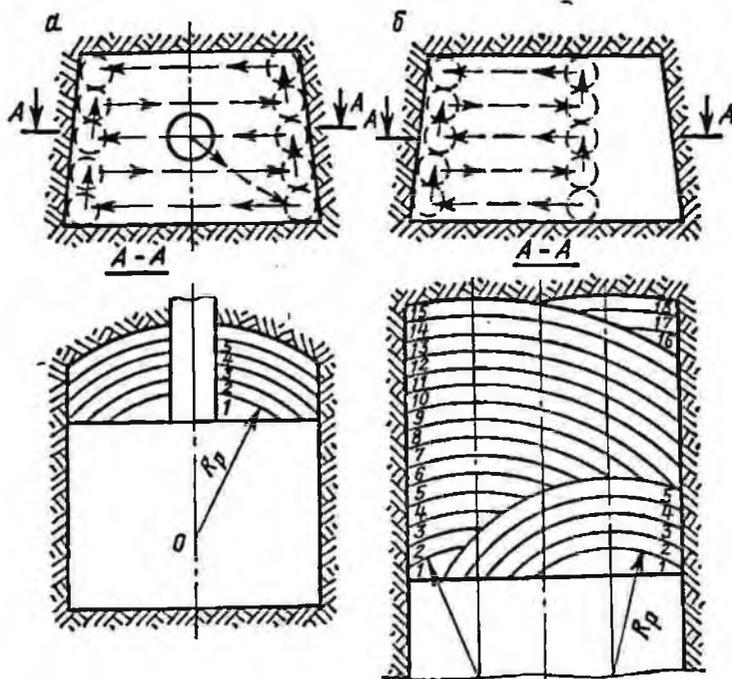


Рис. 13. Комбинированное разрушение забоя:  
а — с опережающей скважиной; б — с образованием уступа

блоков дает возможность создания конструкции исполнительного органа, выполняющего значительно меньше подготовительных маневров и холостых движений. По времени совмещаются процессы прорезания в массиве щелей и отделения междущелевых целиков: траектория движения инструмента упрощается, а удельные энергозатраты на разрушение всего забоя (18—36 МДж/м<sup>3</sup>) позволяют при мощности привода 200 кДж/с обеспечить скорость проведения выработки сечением 10 м<sup>2</sup> до  $0,56 \times 10^{-3}$  м/с. Если совместно с прорезанием щелей алмазным инструментом использовать щелевые отрывники, мощные гидронеомударники и клиновые ролики, то можно выделить

несколько рациональных схем разрушения глухого забоя в зависимости от формы сечения выработки.

На рис. 13, а показана схема, для реализации которой используется исполнительный орган в виде рукоятки, один конец которой шарнирно закреплен на корпусе комбайна, а другой — перемещается по сфере радиусом  $R_p$ . Подвижный конец рукоятки оснащен алмазным диском, радиус сферы которого равен радиусу его качания, а диаметр определяется размерами выработки и допустимой кусковатостью продуктов разрушения. Предварительно в центральной части забоя проводится опережающая скважина, в которую заводится алмазный диск с отрывником на глубину, равную толщине слоя 1. Затем, перемещая исполнительный орган по траектории, обозначенной стрелками, и производя разрушение слоя 1, алмазный диск вновь располагается в зоне опережающей скважины и подается вперед на толщину слоя 2, который разрушается аналогично предыдущему. Последующие 3, 4 и т. д. слои разрушаются в таком же порядке, а опережающая скважина периодически восстанавливается. Такая схема разрушения предполагает наличие однодискового исполнительного органа, выполненного в виде рукоятки постоянного радиуса, и позволяет проводить выработки с различной формой сечения. Недостатками этой схемы являются необходимость иметь опережающую скважину для первоначального врезания алмазного диска и наличие одного породоразрушающего инструмента, что ограничивает производительность проходки.

На рис. 13, б показана схема, по которой послойное разрушение забоя производится без предварительного образования опережающей скважины, и врезание алмазного диска осуществляется в уступ массива, образующийся в результате смещения исполнительного органа относительно оси выработки.

Более производительной и простой схемой является схема разрушения при фиксированном положении относительно оси выработки двух исполнительных органов постоянного радиуса качания (рис. 14, а). Одновременное или поочередное врезание в массив породоразрушающего инструмента и перемещение его от средней части выработки в противоположных направлениях позволяют непрерывно возобновлять центральный уступ на забое. При движении рукоятки радиусом  $R_p$  на угол  $\alpha$  разрушается слой породы толщиной  $B_{ц} + b_{ц}$ . Одновременно с зарубкой левого исполнительного органа такую же операцию выполняет правый исполнительный орган, ось качания которого расположена в точке  $O_2$ , но его инструмент должен располагаться выше или ниже левого исполнительного органа, т. е. их рукоятки должны не пересекаться, а скрещиваться в пространстве при зарубке в уступ. Разрушение по этой схеме позволяет использовать достаточное число породоразрушающих инстру-

ментов, обеспечивающих за одно качание рукоятей разрушение всей поверхности забоя на толщину слоя  $B_{ц} + b_{ц}$ .

Послойное разрушение забоя комбинированным способом производится и без образования специального уступа для зарубки дискового породоразрушающего инструмента. С этой целью угол качания рукояти исполнительного органа выбирается таким, чтобы в крайних положениях инструмент выводился из контакта с забоем (рис. 14, б). При повороте рукояти на

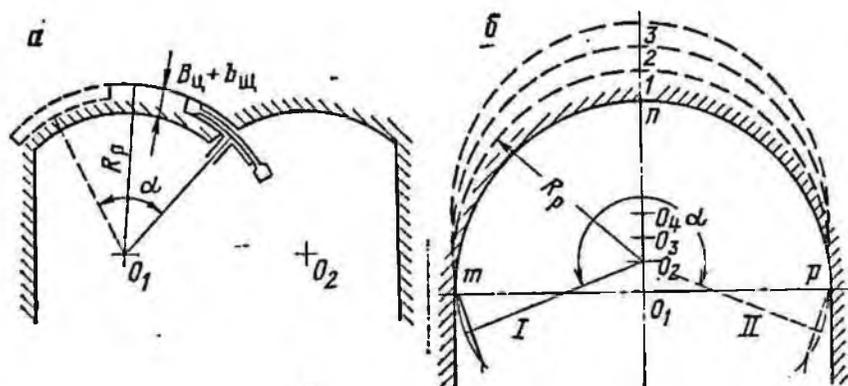


Рис. 14. Комбинированное разрушение забоя:  
а — с образованием уступа; б — боковым врезанием

угол  $\alpha$ , больший  $180^\circ$ , и ее перемещении в точку  $O_2$  исполнительный орган занимает положение I. Качание рукояти из положения I на угол  $\alpha$  в положение II сопровождается разрушением слоя породы. В положении II при перемещении оси качания в точку  $O_3$  и повороте рукояти против часовой стрелки на угол  $\alpha$  разрушается второй слой породы. Аналогично разрушаются и другие слои породы. Рукоятей, расположенных на одной вертикальной оси, может быть несколько, а движение их может происходить как в одну сторону, так и навстречу друг другу. Хотя эта схема разрушения обеспечивает минимальный холостой путь породоразрушающего инструмента, сечение отделяемого слоя породы меняется от нуля до максимальной заданной величины, что повышает удельный энергозатраты на разрушение.

Обе схемы разрушения (см. рис. 14) имеют недостаток, который заключается в сложности приспособления исполнительного органа к изменениям сечения и формы выработки: для каждого типоразмера выработки необходимо выбирать соответствующие радиусы качания рукоятей исполнительного органа.

Комбайн, работающий по схеме послойного разрушения забоя с образованием уступа смещением оси качания рукоятки исполнительного органа относительно оси выработки, является сравнительно легким и маневренным и предназначен для проведения подземных выработок небольшой протяженности.

В рассмотренных схемах комбинированного разрушения забоя отделение надщелевых целиков осуществляется как щелевыми отрывниками, так и ударом со стороны выработанного пространства. В последнем случае ударник не совмещается с режущим алмазным диском, а устанавливается на отдельной

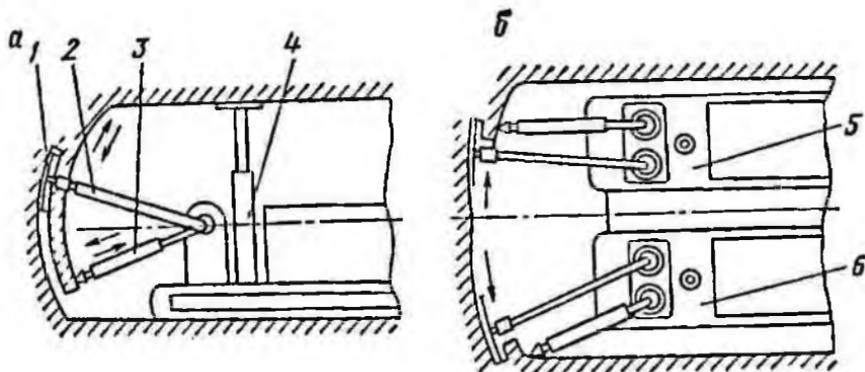


Рис. 15. Отделение междущелевого целика ударом:

1 — алмазный диск; 2, 3 — подвижные рукоятки соответственно алмазного диска и ударника; 4 — распорная стойка; 5, 6 — соответственно правый и левый корпуса комбайна

рукоятн. Удары наносятся либо по целику после прорезания щели (рис. 15, а), либо на уровне контакта диска с породой (рис. 15, б). Использование в комбинированных схемах щелевых отрывников или ударников определяется механическими свойствами горных пород.

Разрушение забоя алмазными пилами с возвратно-поступательным движением режущей части и клиновыми роликами эффективно в случае оснащения исполнительного органа большим числом алмазных пил. Это условие вызвано малыми скоростями резания (до 2 м/с), тогда как у дисковых инструментов скорость резания находится в пределах 30—60 м/с. Исследованиями [14, 18] установлено, что производительность алмазного разрушения пропорциональна скорости резания, поэтому при одинаковой длине дуги контакта инструмента с породой 15—20 штрипе по производительности равноценны одному диску. Работу исполнительного органа комбайна, оснащенного алмазными штрипсами и клиновыми роликами, характеризует непрерывность процесса разрушения, что делает эту схему перспективной.

Таблица 4

Возможность применения (В) и применяемость (П) горных машин с алмазным инструментом

Схема разрушения	Бурение						Добыча штучного камня	
	эксплуатационное		разведочное		взрывных скважин и шпуров		открытая	
	В	П	В	П	В	П	В	П
Сплошная	+	+	+	+	+	+	—	—
Вырезанием блоков	+	+	+	+	+	+	++	+
Комбинированная	+	—	++	++	+	+	+	+

Продолжение табл. 4

Схема разрушения	Добыча штучного камня		Обработка камня				Комбайновая проходка горных выработок	
	подземная		распиловка, окантовка		шлифовка			
	В	П	В	П	В	П	В	П
Сплошная	—	—	—	—	++	++	—	—
Вырезанием блоков	+	—	+	+	++	++	+	—
Комбинированная	+	—	+	—	+	—	++	—

Примечание. Хорошая возможность применения и применяемость (+); весьма хорошая возможность применения и применяемость (++); отсутствие необходимых машин (—); применение нецелесообразно (—).

Большое разнообразие технологических схем разрушения горных пород с использованием алмазного инструмента показывает перспективность широкого использования алмазов в горном деле. В настоящее время алмазный инструмент еще ограниченно используется для разрушения горных пород. О возможности применения и применяемости горных машин с алмазным инструментом можно судить по данным табл. 4.

Из табл. 4 видно, что алмазный инструмент применяется при различных видах горных работ. Так, исполнительные органы, реализующие сплошную схему разрушения, широко используются и имеют хорошую перспективу применения при бурении, в то время как в других областях (кроме шлифовки камня) реализация этой схемы нецелесообразна. Схема вырезания блоков алмазным инструментом в настоящее время используется на открытых работах для добычи штучного камня. Несмотря на

перспективность применения этой схемы, она не получила распространения при подземной добыче полезных ископаемых и проведении горных выработок из-за отсутствия специальных машин. Наиболее широкие возможности для реализации исполнительными органами горных машин имеет комбинированная схема разрушения, которая применима почти во всех областях горных работ и особенно при разведочном бурении с извлечением керна и комбайновой проходке горных выработок. Для кернового бурения наша промышленность серийно выпускает станки и инструмент, а для остальных работ, за исключением нескольких опытных образцов, проводятся поисковые экспериментальные исследования.

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИНСТРУМЕНТА

## § 1. ГЕОМЕТРИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ

Основными параметрами, определяющими геометрию рабочей поверхности алмазного инструмента, являются: число алмазных зерен в алмазонасном слое, на рабочей поверхности и в каждой линии резания; их размеры, форма и концентрация. Эти показатели во многом определяют режимы работы инструмента, а также его эксплуатационные показатели.

Заданное расположение алмазов на рабочей поверхности для однослойного и в объеме для многослойного инструмента достигается в процессе его изготовления. Наибольшие трудности вызывает геометрически правильное расположение алмазов в импрегнированном инструменте при использовании в качестве алмазного сырья шлиф- и микропорошков. Электролитическое изготовление инструмента с применением специальных установок [20] значительно упрощает задачу распределения алмазных зерен в заданном порядке, то же достигается и методом гранулирования [13], тогда как наиболее широко распространенный способ изготовления методом порошковой металлургии практически не дает возможности прогнозировать расположение алмазов. В последнем случае расположение алмазов носит случайный характер и характеризуется значительной неравномерностью их распределения в объеме связки.

Для диска диаметром 800 мм и толщиной 7 мм при объемной концентрации 12,5% и зернистости А800/630 среднее число зерен и расстояние между ними на рабочей поверхности сегмента составили соответственно 60 шт. и 6,5 мм, причем коэффициенты вариации в обоих случаях не превышали 25%.

Примерно в таких же пределах находится неравномерность распределения зерен на рабочей поверхности брусков и сегментов штрипсового инструмента и буровых импрегнированных коронок. Относительно небольшой коэффициент вариации дает возможность с допустимой для инженерных расчетов точностью пользоваться средними значениями числа зерен и расстояний между ними на поверхности сегмента.

Форма выступающей из связки части алмазных зерен близка к шаровой, так как острые грани зерен быстро разрушаются в процессе работы. Это позволяет рассматривать алмазные зерна как шарики радиусом  $r$ . Размер алмазных зерен оп-

ределяется номером зернистости и, согласно ГОСТ 9206—70, имеет отклонение от среднего не более 15%.

Следовательно, с учетом сделанных допущений можно считать, что алмазные зерна, имеющие форму шариков, равномерно распределены в объеме сегмента. Такая идеализация структуры алмазосодержащих элементов позволяет использовать аналитический аппарат, с помощью которого можно установить кинематические закономерности формирования эксплуатационных показателей работы инструмента от его характеристики.

Если в алмазосодержащем слое сегмента длиной  $l$ , шириной  $b$  и высотой  $c$  объемная концентрация алмазных зерен равна  $K_0$  (%), то объем, занимаемый алмазными зернами, будет

$$Q_3 = \frac{lbcK_0}{100}, \text{ м}^3. \quad (2)$$

В сегменте высотой  $2r$  с учетом объема зерна  $W_3$  и равномерного распределения зерен число последних составит

$$n = \frac{Q_3}{W_3} = 0,48 \cdot 10^{-2} \frac{lbK_0}{r^2}. \quad (3)$$

Алмазные зерна удерживаются связкой до тех пор, пока выступающая над ней часть зерна не превысит его радиуса. В любом сечении, параллельном рабочей поверхности сегментов, половина зерен обнажена на большую или равную их радиусу величину и должна выпасть из связки. Следовательно, на рабочей поверхности алмазного сегмента зерен будет в два раза меньше, чем при подсчете по формуле (3). С учетом систематической ошибки, обусловленной идеализацией распределения зерен — шариков в объеме сегмента, число зерен на поверхности инструмента будет

$$n_s = 0,23 \cdot 10^{-2} \frac{lbK_0}{r^2}. \quad (4)$$

Алмазные зерна на рабочей поверхности инструмента располагаются в несколько линий резания, число которых определяется, с одной стороны, шириной инструмента, а с другой — зернистостью алмазов, т. е.

$$m = b/2r.$$

Тогда число алмазных зерен в одной линии резания определится, как

$$n_l = 0,47 \cdot 10^{-2} \frac{lK_0}{r}, \quad (5)$$

а расстояние между зернами в одной линии резания

$$t = \frac{l}{0,47 \cdot 10^{-2} lK_0}, \text{ м}. \quad (6)$$

Число зерен на квадратном сантиметре, подсчитанное по формуле (4) для принятых выше значений концентраций и зернистости, равно 18 шт. Расчетные данные достаточно близки к экспериментальным, поэтому полученные зависимости можно использовать в практических целях.

В силу разновысотности алмазных зерен по отношению к поверхности связки число зерен, участвующих в резании, зависит от заглупления, причем чем больше заглупление в массив, тем большее число зерен принимает участие в резании. При повороте алмазного диска на некоторый угол  $\varphi$  (рис. 16) зерна, находящиеся в контакте с породным массивом, за каждый оборот диска разрушают объем породы, величина которого зависит от скорости резания, скорости подачи, глубины резания, радиуса диска и ширины прорезаемой щели. Здесь следует заметить, что объем разрушенной породы за один оборот диска не зависит от числа зерен на его рабочей поверхности и от величины зерен.

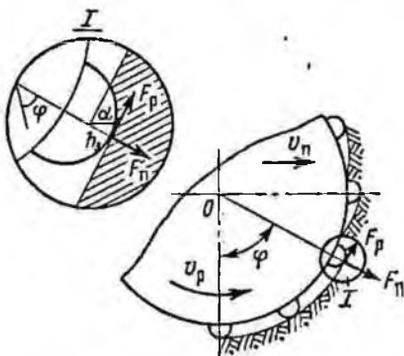


Рис. 16. Схема расчета толщины стружки, срезаемой алмазными зернами

Сечение стружки в радиальной плоскости непрерывно изменяется, достигая максимальной величины в момент выхода из контакта с породой при глубине резания, меньшей или равной

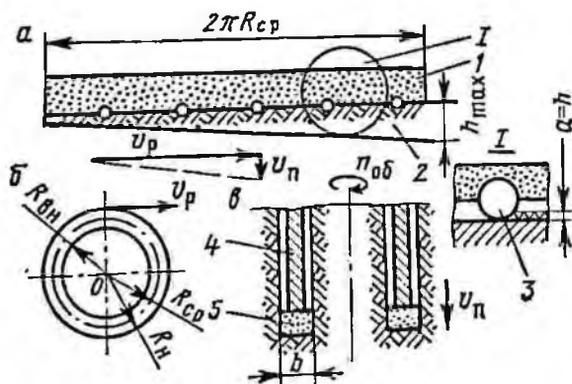


Рис. 17. Схема разрушения забоя коронкой:  
 а — схема контакта алмазосодержащего слоя с забоем;  
 б, в — параметры коронки; 1 — алмазосодержащий слой;  
 2 — забой; 3 — алмазное зерно; 4 — корпус коронки; 5 — матрица коронки

не участвует (зерно 5). Тогда вероятность того, что зерно пересечет поверхность забоя, определится как отношение площадей прямоугольников  $AB_1CD$  и  $A_1BC_1D_1$  (см. рис. 19):

$$S_{A_1BC_1D_1} = l[r - (r - h_3)] = lh_3; \quad S_{AB_1CD} = l[(2r - h_3) - (r - h_3)] = lr$$

и

$$P = \frac{S_{A_1BC_1D_1}}{S_{AB_1CD}} = \frac{h_3}{r}. \quad (11)$$

С учетом найденной вероятности  $P$  и принимая во внимание формулы (4) и (5), фактическое число участвующих в резании зерен определится как:

$$n_{r\phi} = 0,47 \cdot 10^{-2} \frac{R\eta K_0 c_1 h_3}{r^2}, \quad (12)$$

$$n_{s\phi} = 0,23 \cdot 10^{-2} \frac{R\eta b K_0 c_1 h_3}{r^2}. \quad (13)$$

Здесь коэффициент  $c_1 = 1 - \frac{l_n}{l_{op} + l_n}$  учитывает прерывистость рабочей поверхности;  $l_n$  — длина промежутков между алмазосодержащими брусками или сегментами, длина которых соответственно  $l_{op}$  или  $l_c$ .

Число зерен, контактирующих со срезаемым слоем толщиной  $h_i$ , соответствующей углу  $\varphi_i$ , для одной линии резания  $n_{i\phi_i}$  и для всей ширины диска  $n_{s\phi_i}$  определится совместным решением (7), (12) и (13):

$$h_i = 14,8r \left( \frac{v_{ii}}{K_0 v_p c_1} \sin \varphi_i \right)^{1/2}, \text{ м}; \quad (14)$$

$$n_{i\phi_i} = 6,7 \cdot 10^{-2} \frac{R\eta v_i}{r} \left( \frac{K_0 v_{ii} c_1}{v_p} \sin \varphi_i \right)^{1/2}; \quad (15)$$

$$n_{s\phi_i} = 3,4 \cdot 10^{-2} \frac{Rb\eta v_i c_1}{r^2} \left( \frac{K_0 v_{ii}}{v_p} \sin \varphi_i \right)^{1/2}. \quad (16)$$

Для коронки  $l = 2\pi R_{cp} c_1$ , тогда с учетом формул (12) и (13) имеем:

$$n_{i\phi} = 2,9 \cdot 10^{-2} \frac{K_0 R_{cp} c_1 h_3}{r^2}; \quad (17)$$

$$n_{s\phi} = 1,4 \cdot 10^{-2} \frac{K_0 R_{cp} c_1 b h_3}{r^3}. \quad (18)$$

Принимая во внимание длину брусков  $l_6$ , промежутки между ними  $l_n$  на длине хода  $l_x$ , фактическое число зерен, участвующих в резании, для полосовой пилы определится по формулам:

$$n_{l\phi} = \frac{0,45 \cdot 10^{-2} K_0 l_x c_1 h_3}{r^2}; \quad (19)$$

$$n_{s\phi} = \frac{0,23 \cdot 10^{-2} K_0 b l_x c_1 h_3}{r^3}. \quad (20)$$

С учетом формул (8), (9), (17), (18), (19) и (20) заглупление зерна в породе и фактическое число зерен для коронок будет:

$$h_3 = 14,8 r \left( \frac{v_n}{v_p c_1 K_0} \right)^{1/2}, \text{ м}; \quad (21)$$

$$n_{l\phi} = 0,42 \frac{R_{ср}}{r} \left( \frac{K_0 v_n c_1}{v_p} \right)^{1/2}; \quad (22)$$

$$n_{s\phi} = 0,21 \frac{R_{ср} b}{r^2} \left( \frac{v_n K_0 c_1}{v_p} \right)^{1/2}; \quad (23)$$

для штрипсовых пил:

$$h_3 = 14,8 r \left( \frac{v_n}{v_p K_0 c_1} \right)^{1/2}, \text{ м}; \quad (24)$$

$$n_{l\phi} = 6,7 \cdot 10^{-2} \frac{l_x}{r} \left( \frac{v_n K_0 c_1}{v_p} \right)^{1/2}; \quad (25)$$

$$n_{s\phi} = 3,4 \cdot 10^{-2} \frac{l_x b}{r^2} \left( \frac{v_n K_0 c_1}{v_p} \right)^{1/2}. \quad (26)$$

Анализируя формулы (12) и (13), можно заметить, что фактическое число зерен, находящихся в контакте с массивом, определяется не только характеристикой алмазного диска — его радиусом, концентрацией и зернистостью алмазов, но также зависит от скоростей резания и подачи.

Число зерен, контактирующих с породой в пределах сечения стружки, определяемого углом  $\phi_i$ , находится по формулам (15) и (16). Например, при  $\phi_i$ , равном 0 или  $\pi$ , толщина  $h_i = 0$  и число зерен, контактирующих с массивом в этих участках, также равно нулю. В случае  $\phi_i = \frac{\pi}{2}$  величина  $h_i$  имеет максимальное значение и число зерен в заданном участке наибольшее.

Для простоты дальнейших рассуждений формулу (14) запишем в виде

$$h = r\lambda \sqrt{\sin \varphi}, \text{ м,} \quad (27)$$

где  $\lambda = \sqrt{\frac{70\pi v_{II}}{c_1 K_0 v_p}}$  — коэффициент режимов резания.

Тогда, имея в виду, что площадь срезаемой стружки в плане (рис. 20, а) представляет собой криволинейный треугольник,

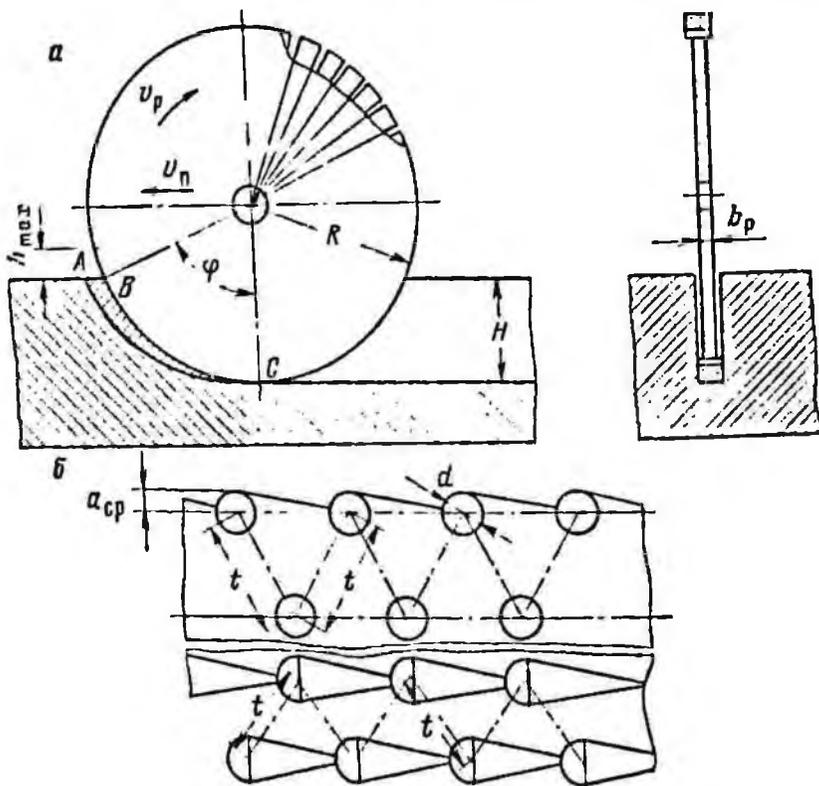


Рис. 20. Схемы резания породы алмазным диском (а) и идеализированная поверхность открытого алмазного сегмента (б)

средняя толщина срезаемого слоя на дуге контакта определится интегрированием выражения (27)

$$h_{ср} = \frac{1,72 r \lambda}{\varphi} (\varphi - 0,102 \sin 2\varphi), \text{ м.} \quad (28)$$

С учетом значения  $\lambda$  формула (28) примет вид

$$h_{ср} = 25,5 r \left( \frac{v_{II}}{c_1 K_0 v_p} \right)^{1/2} \left( 1 - 0,102 \frac{\sin 2\varphi}{\varphi} \right), \text{ м.} \quad (29)$$

Согласно формулам (12) и (13) и с учетом формулы (29) фактические числа участвующих в резании зерен на дуге и поверхности контакта алмазного диска с разрушаемым массивом соответственно составят:

$$n_{1\phi} = 11,5 \frac{R\varphi}{r} \left( \frac{K_{0c_1} v_{II}}{v_p} \right)^{1/2} \left( 1 - 0,102 \frac{\sin 2\varphi}{\varphi} \right); \quad (30)$$

$$n_{s\phi} = 5,8 \frac{R\varphi b}{r^2} \left( \frac{K_{0c_1} v_{II}}{v_p} \right)^{1/2} \left( 1 - 0,102 \frac{\sin 2\varphi}{\varphi} \right). \quad (31)$$

## § 2. СКОРОСТЬ ПОДАЧИ

Продукты разрушения в процессе работы алмазного инструмента непрерывно удаляются из зоны резания за счет сил трения между потоком штыба и рабочей поверхностью инструмента. Усилие трения пропорционально нормальному давлению продуктов разрушения на рабочую поверхность инструмента, которое, в свою очередь, зависит от количества продуктов разрушения в зоне резания. При установившемся режиме количество продуктов разрушения, образующееся в зоне резания, очевидно, равно количеству этих продуктов, выносимому из нее. С изменением режимов работы инструмента изменяются характеристики потока продуктов разрушения, его плотность и скорость перемещения, что вызывает изменение усилия трения инструмента о породу. С ростом плотности потока увеличивается и скорость его перемещения, приближаясь по величине к скорости резания. Исследованиями [15, 18] установлено, что в нормальных режимах работы алмазного инструмента скорость штыба несколько меньше скорости резания.

С увеличением скорости подачи алмазного инструмента при постоянных скорости резания и длине контакта с забоем объем образующихся в зоне резания продуктов разрушения возрастает, что вызывает повышение давления на рабочую поверхность инструмента. При этом возрастают усилие трения и, следовательно, суммарное усилие резания и суммарная потребляемая мощность. С дальнейшим ростом скорости подачи разность между скоростями резания и перемещения потока возрастает и вновь образующиеся продукты разрушения не успевают выноситься из зоны резания. Уплотненная разрушенная масса заполняет зазоры между рабочей поверхностью алмазного инструмента и забоем, что приводит к нарушению его нормальной работы, росту усилий трения и потребляемой мощности. В этом случае увеличивается также износ инструмента.

Если промежутки между поверхностью забоя и поверхностью связки будут наполнены уплотненным штыбом, то резание становится невозможным. Следовательно, при выборе режимов резания должно соблюдаться равенство объема про-

дуктов разрушения объема между поверхностью забоя и рабочей поверхностью инструмента, который в дальнейшем будем называть объемом заполнения.

Объем продуктов разрушения больше объема призмы, основание которой равно площади криволинейного треугольника  $ABC$ , а высота — ширине реза (см. рис. 20, а). Сторона  $AB$  соответствует максимальной толщине срезаемой стружки, величина которой зависит от скоростей резания и подачи, радиуса диска и центрального угла. Сторона  $BC$  является дугой окружности диска и определяется углом  $\varphi$ . Коэффициент разрыхления  $C_p$  породы зависит от фракционного состава продуктов разрушения. Для его определения образцы песчаника разрушались в ступе до размеров частиц шлама, образуемого алмазным диском. По первоначальному объему образца пробы и объему, полученному после его разрушения, подсчитывался коэффициент разрыхления. При резании пород алмазным диском зернистостью А800/630 коэффициент разрыхления оказался равным 1,52.

Объем продуктов разрушения с учетом коэффициента разрыхления определяется из выражения

$$W_1 = 0,5 \frac{C_{p\varphi}}{v_p} R^2 v^2 b_p, \text{ м}^3. \quad (32)$$

Для определения объема заполнения рассмотрим состояние идеализированной поверхности вскрытого сегмента (рис. 20, б). За нерабочей частью каждого алмазного зерна имеется цепик из материала связки, который простирается от вершины выступающей части предыдущего зерна до основания последующего по направлению скорости резания и представляет собой часть конуса с основанием, равным площади диаметрального сечения выступающей части зерна, и высотой, равной расстоянию между зернами. Таким образом, объем заполнения определяется как произведение ширины диска, средней высоты выступающей части алмазного зерна и длины дуги контакта за вычетом объема цепиков связки и выступающей части алмазных зерен на площади контакта диска с породой:

$$W_2 = 0,5 r R \varphi C_1 b - [0,2(t - 0,58 r) r^2 + 0,33 r^3] n_s, \text{ м}^3, \quad (33)$$

где  $t = \frac{R \varphi C_1}{n_l}$  — расстояние между алмазными зернами, м.

Решая совместно уравнения (32) и (33) относительно  $v_n$  и пренебрегая разницей между  $b_p$  и  $b$ , получим

$$v_n = \frac{0,8 r C_p C_1 (1 - 1,2 \cdot 10^{-3} K_0)}{C_p R \varphi}, \text{ м/с}. \quad (34)$$

Как видно из полученного выражения, рациональное отношение  $v_n/v_p$  существует для любой скорости резания, причем для каждой скорости резания можно отыскать только одно значение скорости подачи, при котором наилучшим образом будет использоваться режущая способность алмазного инструмента, т.е. будет соблюдаться равенство объема продуктов разрушения объему заполнения.

Анализ выражения (34) показывает, что с увеличением зернистости алмазов отношение  $v_n/v_p$  возрастает, тогда как с ростом остальных величин, входящих в формулу, рациональное соотношение уменьшается. Объясняется это тем, что «критическая» толщина стружки, срезаемой алмазным диском, пропорциональная рациональному отношению  $v_n/v_p$ , с ростом величины алмазных зерен увеличивается, а с увеличением других параметров формулы (34) — уменьшается. Однако степень влияния отдельных параметров на величину отношения  $v_n/v_p$  не одинакова. Менее других параметров влияет на это соотношение концентрация алмазов в сегментах. Так, недоучет этого влияния даже при 25%-ной объемной концентрации вносит ошибку в определение величины максимального соотношения порядка 3%. При других, наиболее употребительных для алмазного породоразрушающего инструмента концентрациях — 12,5 и 6,25% ошибка составляет около 1,5 и 0,7% соответственно. Поэтому для практических расчетов при определении величины соотношения между скоростями подачи и резания членом, выражающим влияние концентрации алмазов в формуле (34), можно пренебречь и тогда формула примет вид

$$\frac{v_n}{v_p} = \frac{0,78 r}{C_p R \varphi} \quad (35)$$

Выражение (35) позволяет с достаточной степенью точности найти рациональные режимы работы алмазного диска с известной характеристикой при разрушении породы с заданным коэффициентом разрыхления.

С использованием расчетных схем (см. рис. 17 и 18) выполнены аналогичные исследования по выявлению связи между характеристикой рабочей поверхности инструмента и режимами его работы применительно к буровой коронке и полосовой пиле.

Для буровой коронки значения объема разрушения и объема заполнения имеют такой же вид, как и для диска, так как геометрия ее рабочей поверхности соответствует геометрии, показанной на рис. 20, б.

После приравнивания  $W_1$  и  $W_2$  и решения уравнения относительно  $v_n/v_p$  для коронки получено выражение

$$\frac{v_n}{v_p} = \frac{0,8 r C_1}{C_p \pi (R_n + R_{ан})} (1 - 1,2 \cdot 10^{-3} K_o), \quad (36)$$

где  $R_{н}$  и  $R_{вн}$  — соответственно наружный и внутренний радиус рабочей части коронки, м.

Для полосовых пил объем разрушения в соответствии с рис. 18 может быть представлен выражением

$$W_1 = \frac{v_{н}}{v_p} l_x \frac{l_x b C_p}{2}, \text{ м}^3. \quad (37)$$

Исследования [12, 15] показали, что геометрия рабочей поверхности алмазных полосовых пил отличается от геометрии режущих дисков и буровых коронок. Конусообразные целики связки, которые имеют место на рабочей поверхности дисков и коронок и располагаются за алмазными зернами в направлении скорости резания, у штрипсовых пил отсутствуют и высота алмазных зерен, выступающих над связкой, не превышает 0,3 г. Это обусловлено возвратно-поступательным движением инструмента в процессе работы, в результате чего подпорная стенка из связки изнашивается, сила резания и знакопеременная нагрузка, действующая на алмазные зерна, приводит к их выпаданию из связки при меньшем облажении, чем при работе инструмента с постоянным направлением скорости резания. С учетом этого для штрипсового инструмента объем заполнения

$$W_2 = 0,3 r l_x C_1 t - 0,33 r^3 n_s, \text{ м}^3. \quad (38)$$

Используя формулу (4) и имея в виду, что длина контакта на длине хода штрипсового инструмента с породой  $l = l_x C_1$ , получим соотношение, определяющее рациональные режимы работы в зависимости от характеристики штрипсового инструмента, приравняв  $W_1$  и  $W_2$  и решив тождество относительно  $v_{н}/v_p$ :

$$\frac{v_{н}}{v_p} = \frac{0,6 r C_1}{l_x C_p} (1 - 2,54 \cdot 10^{-3} K_0). \quad (39)$$

Структура формулы (39) аналогична структуре формул (34) и (36), что подтверждает общность закономерностей, происходящих в зоне контакта инструмента с породой. Для полосовых пил влияние концентрации алмазов примерно в два раза больше, чем для дисков и коронок, поэтому учет ее целесообразен при расчете максимальной толщины стружки.

У штрипсовых пил расстояние между алмазными брусками значительно и при изготовлении пил по требованию потребителя инструмента оно может быть изменено. Повышение производительности машины, оснащенных полосовыми пилами, наиболее целесообразно осуществлять выбором рациональной характеристики инструмента и расстояния между алмазными брусками. Дело в том, что повышение скорости резания связано с увеличением числа двойных ходов пыльной рамы машины, а это увеличивает силы инерции, связанные с возвратно-поступательным движением пыльной рамы, масса которой зна-

чительна. У одних машин имеется возможность регулирования величины  $l_x$ , у других она постоянна. При заданной производительности, пользуясь формулой (39), можно определить максимально допустимые расстояния между брусками  $l_{\Pi}$  или минимально необходимую длину бруска  $l_{бр}$ . Для этого уравнение (39) необходимо решить относительно  $l_{бр}$  и  $l_{\Pi}$ :

$$\frac{l_{бр}}{l_{бр} + l_{\Pi}} = \frac{1,67 v_{п} l_x C_p}{(1 - 0,27 \cdot 10^{-3} K_0) v_{п}} \quad (40)$$

Так как длина алмазосодержащих брусков регламентируется ТУ2-037-101—73 «Бруски алмазные для штрипсового инструмента», то соотношение правой части равенства (40) показывает, какая доля длины рабочей поверхности штрипсовой пилы приходится на алмазные бруски. Например, при  $l_{бр}/l_{бр} + l_{\Pi} = 1$  промежутки между брусками отсутствуют, при  $l_{бр}/l_{бр} + l_{\Pi} = 0,6$  60% длины пилы приходится на бруски, а 40% — на промежутки между ними. Очевидно, что для выбранного расстояния между брусками с известной характеристикой при постоянной скорости резания каждому значению длины хода пилы соответствует определенная величина максимальной скорости подачи, причем с увеличением скорости подачи длина хода пилы должна уменьшаться.

Для алмазных брусков зернистостью А800/630 и объемной концентрацией 12,5% при скорости резания  $v_{п} = 1$  м/с построены зависимости необходимой длины хода пилы от максимальной скорости подачи (рис. 21). Величина коэффициента разрыхления горных пород при разрушении штрипсовыми пилами больше, чем при разрушении дисками и коронками; исследованиями авторов определено среднее значение этого коэффициента, равное двум. Это объясняется тем, что в зоне контакта

алмазного бруска штрипсовой пилы с породой продукты разрушения содержат большое количество охлаждающей жидкости, тем самым увеличивая объем продуктов разрушения, который располагается в объеме заполнения. Из рис. 21 видно, что большая производительность может быть достигнута при отсутствии промежутков между алмазными брусками. Другим способом повышения производительности является снижение длины хода пилы. Так, при  $l_{бр}/l_{бр} + l_{\Pi} = 0,6$  (кривая 2) с умень-

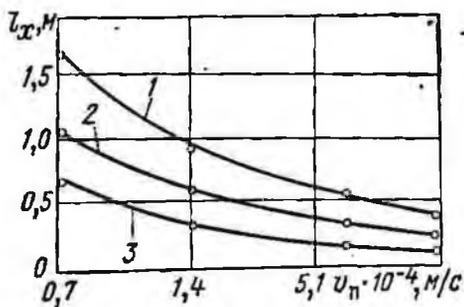


Рис. 21. Зависимости (1—3) длины хода пилы  $l_x$  от максимальной скорости подачи при  $l_{бр}/l_{бр} + l_{\Pi}$  соответственно 1; 0,6; 0,4

шенем длины хода пилы в два раза (с 1 до 0,5 м) максимальная производительность увеличивается с  $6,91 \cdot 10^{-5}$  до  $13,82 \cdot 10^{-5}$  м/с. Однако, согласно формуле (40), уменьшение длины хода пилы должно осуществляться при постоянной скорости резания, что неизбежно увеличит число двойных ходов пыльной рамы и тем самым вызовет большее воздействие сил инерции на конструкцию станка.

Установленные аналитические зависимости подтверждаются экспериментальными данными (рис. 22).

Из рис. 22 видно, что при резании на глубине 0,25 м независимо от величины скорости резания наименьшие удельные затраты энергии имеют место при отношении  $v_n/v_p$ , составляю-

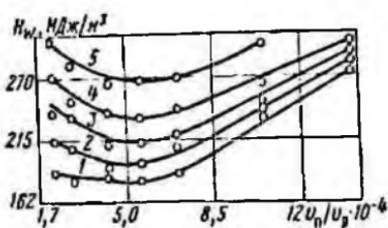


Рис. 22. Зависимости (1—5) удельных затрат энергии на резание алмазным диском от отношения  $v_n/v_p$  при скорости резания соответственно 12, 24, 32, 47 и 54 м/с ( $H=0,25$  м,  $v_p=1$  м/с,  $C_p=2$ ,  $r=0,0004$  м,  $K=12,5\%$ )

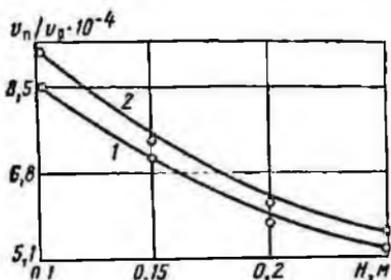


Рис. 23. Зависимости оптимального отношения  $v_n/v_p$  от глубины резания  $H$ :

1 — экспериментальная; 2 — расчетная

щем около  $0,55 \cdot 10^{-3}$ . При отношении  $v_n/v_p$ , меньшем максимального, удельные энергозатраты увеличиваются за счет большего диспергирования продуктов разрушения, а при  $v_n/v_p$ , большем максимального, увеличиваются в результате роста мощности, затрачиваемой на преодоление возросшей силы трения.

С изменением глубины резания максимальное соотношение между скоростями подачи и резания не остается постоянным, что согласуется с формулой (34). Увеличение глубины резания приводит к уменьшению максимальной величины  $v_n/v_p$ , и наоборот, меньшей глубине резания соответствует большее рациональное значение этого соотношения. Так, с увеличением глубины резания от 0,1 до 0,25 м рациональная величина  $v_n/v_p$  (рис. 23) уменьшается от  $0,83 \cdot 10^{-3}$  до  $0,55 \cdot 10^{-3}$ . Объясняется это тем, что для большей глубины резания средняя толщина стружки, срезаемой алмазными зернами, достигает критического значения раньше, т. е. при меньшем по величине отношении  $v_n/v_p$ . Такое же явление отмечалось нами ранее при анализе формулы (40) применительно к штрипсовой пиле.

Критическая толщина стружки возрастает с ростом зернистости алмазов, так как при этом каждое зерно выступает из связки на большую величину, увеличивается свободное пространство между связкой и забоем для размещения продуктов разрушения. Коэффициент разрыхления породы оказывает на величину критической толщины стружки обратное влияние: с ростом коэффициента разрыхления эта величина уменьшается.

Расчетная зависимость 2 (рис. 23) построена с использованием формулы (34). Как видно из рисунка, экспериментальная кривая располагается ниже расчетной. При этом несовпадение кривых не превышает 10% и объясняется тем, что при выводе формулы для рационального отношения  $v_{п}/v_{р}$  предполагалось

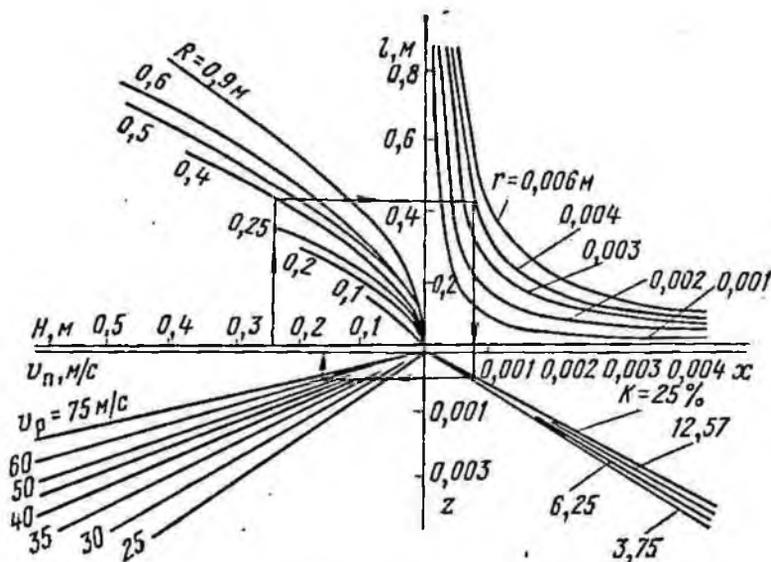


Рис. 24. Номограмма для определения оптимальной скорости подачи алмазного диска при резании карагандинских песчаников

полное заполнение пространства между поверхностями забоя и связки продуктами разрушения. В реальных условиях из-за локальных зон уплотнения продуктов разрушения имеет место их неравномерное распределение в зоне резания, что вызывает уменьшение фактического значения критической толщины срезаемой стружки. Однако, несмотря на сделанное при выводе формулы допущение, аналитическая зависимость позволяет с достаточной точностью определять рациональные режимы работы алмазного диска при резании горных пород.

Исследования кинематических и энергетических зависимостей резания карагандинских песчаников алмазными дисками позволили построить номограмму (рис. 24) для определения

максимальной скорости подачи при известной характеристике инструмента (порядок пользования номограммой показан на рисунке стрелкой). Этой же номограммой, изменив порядок на обратный, можно воспользоваться для определения характеристики алмазного диска в заданных режимах его работы. Выбор инструмента для заданной глубины резания обуславливается максимальным использованием площади полотна режущего диска, т.е. чтобы диаметр диска был максимально возможным. Это позволит избежать увеличения мощности привода исполнительного органа. По аналогичной методике могут быть построены номограммы с использованием соответствующих формул применительно к буровым коронкам и штрипсовым пилам.

### § 3. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Критериями, характеризующими производительность алмазного инструмента, являются скорости проходки шпуров и скважин и образования поверхности щели и объема разрушенной породы. Скорость проходки шпуров и скважин при алмазном бурении является наиболее важным показателем эффективности применения буровой техники. Площадью щелей или площадью пропила удобно характеризовать производительность полосовых и дисковых пил, используемых для распиловки на плиты декоративного и отделочного камня. Производительность добычных и проходческих машин принято оценивать по объему разрушенной породной массы за единицу времени. Различия в критериях оценки производительности разрушения затруд-

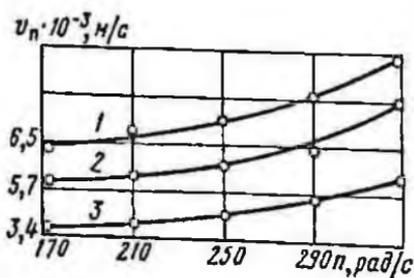


Рис. 25. Зависимости (1—3) производительности бурения алмазной коронкой от частоты ее вращения для осевого усилия подачи соответственно 10 000, 6000 и 4000 Н

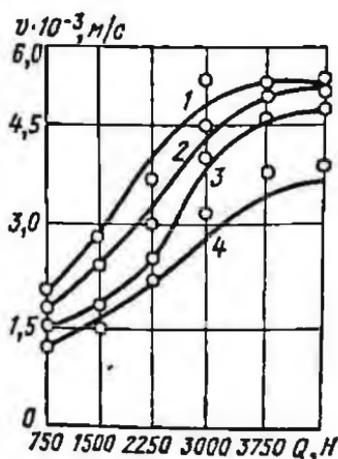


Рис. 26. Зависимости (1—4) производительности бурения алмазной коронкой от осевого усилия подачи при частоте вращения коронки соответственно 210, 190, 168 и 126 рад/с

няют сравнительный анализ по этому показателю и не дают возможности определить степень использования разрушающей способности инструмента.

Сопоставления достигнутой производительности алмазного разрушения инструментом одного и того же типа показывают, что этот показатель колеблется в широких пределах. Так, при бурении глубоких разведочных и эксплуатационных скважин на нефть и газ алмазными долотами производительность составляет 0,13—0,55 мм/с, при бурении взрывных скважин и шпуров производительность колеблется еще в более широких пределах — 0,25—8,3 мм/с [1, 35]. Основное влияние на скорость бурения оказывают режимы работы инструмента, механические свойства пород и условия бурения.

На рис. 25 показаны зависимости производительности бурения от частоты вращения алмазной коронки диаметром 46 мм типа 1АГК с зернистостью алмазов А1000/800 и их объемной концентрацией 25% при бурении шпуров в подземных условиях по песчанику с контактной прочностью 980 МН/м<sup>2</sup> и абразивностью 30 мг.

Из рис. 25 видно, что производительность  $9,2 \cdot 10^{-3}$  м/с достигнута при осевом усилии 9,8 кН и частоте вращения коронки 315 рад/с. Увеличение осевого усилия на инструмент при постоянной скорости вращения коронки обеспечивает прирост производительности до определенных значений осевых усилий, и дальнейшее их увеличение не приводит к росту скорости бурения, а даже снижает ее.

Зависимость производительности бурения от осевого усилия подачи (рис. 26) показывает, что увеличивать осевое усилие подачи свыше 3,4 кН при частоте вращения 210 рад/с нецелесообразно. Производительность бурения до  $9,2 \cdot 10^{-3}$  м/с достигнута при разрушении песчаников средней крепости коронкой с зернистостью алмазов А1000/800 на глубину 2 м при угловой скорости вращения 315 рад/с или при средней линейной скорости резания в 6,5 м/с. Бурение шпуров с большими скоростями резания и на большую глубину значительно увеличивает вибрации буровых штанг и, как следствие этого, вызывает повышенный износ инструмента [23].

Периферийные зерна долота работают в благоприятном режиме резания, тогда как центральные зерна разрушают породу раздавливанием, и поэтому более перспективным инструментом при использовании высокоскоростного привода вращения являются керновые коронки и долота, а также алмазный планетарный инструмент.

Теоретическая производительность алмазного бурения по кинематическим характеристикам больше фактически достигаемой. Так, для коронки 1АГК диаметром 46 мм с объемной концентрацией алмазов 25% и их зернистостью А1000/800 теоретическая производительность составит

Если число зерен, находящихся на одной линии резания и участвующих в разрушении, равно 10, а каждое из них за один оборот коронки снимает слой породы толщиной в  $1/5$  диаметра зерна, или в нашем примере на 0,2 мм, то при частоте вращения коронки 315 рад/с производительность составит 0,1 м/с, что в 10 раз больше фактически достигнутой. Это объясняется тем, что формула для выражения  $v_n$  справедлива в том случае, если продукты разрушения сразу удаляются из зоны резания. В противном случае они заполняют зону резания и препятствуют разрушению забоя. Эффективность удаления продуктов разрушения ухудшается с увеличением глубины бурения и зависит от конструкции коронки. Если вынос продуктов разрушения отстает от их образования в процессе бурения, то наступает так называемая заштыбовка инструментов.

На производительность разрушения влияют также абразивные свойства породы и сопротивляемость ее разрушению. При бурении крепких горных пород типа гранитов, кварцитов и роговиков высокие скорости резания и большие осевые усилия подачи вызывают интенсивное выделение тепла и при недостаточно быстром его отводе из зоны резания температура на поверхности инструмента достигает уровня температуры графитизации алмазов.

Опыт применения алмазного дискового инструмента показывает, что при хорошем охлаждении разрушение пород со скоростями резания 30—60 м/с не вызывает интенсивного температурного разрушения рабочей поверхности и обеспечивает высокую производительность. Так же как и при разрушении пород бурением, производительность дискового инструмента значительно изменяется в зависимости от размеров диска и характеристики инструмента, режимов резания и физико-механических свойств разрушаемой породы (табл. 5).

Из табл. 5 видно существенное отличие производительности разрушения дисковым инструментом примерно одинакового размера и характеристики алмазосодержащего слоя при разрушении различных горных пород. Общая тенденция к уменьшению производительности связана с повышением прочности пород, хотя прямой связи между прочностью пород и производительностью нет. Следует также учитывать, что при распиловке гранита, лабрадорита и мрамора производительность разрушения ограничивается необходимостью получения высокого качества поверхности реза, что значительно упрощает и удешевляет дальнейшую обработку декоративного камня.

Иная цель ставилась при резании песчаника диском диаметром 720 мм и толщиной 32 мм. Этот диск использовался для разрушения песчаника в шахтных условиях и был уста-

## Производительность разрушения горных пород дисковыми алмазными инструментами

Породы	Временное сопротивление сжатию, МН/м <sup>2</sup>	Скорость резания, м/с	Диаметр диска, мм	Толщина диска, мм	Характеристики алмазного слоя			Производительность разрушения, м <sup>3</sup> /с
					зернистость	объемная концентрация, %	тип связи	
Песчаник	68,4—78,4	60	800	7	A800/630	12,5	M50	0,75·10 <sup>-3</sup>
Песчаник	68,6—78,4	52	720	32	A800/630	12,5	M50	1,11·10 <sup>-3</sup>
Известняк	29,4	30—40	630	6	A400/320	12,5	M3	0,33·10 <sup>-3</sup>
Доломит	49,0	30—40	630	6	A400/320	12,5	M3	0,24·10 <sup>-3</sup>
Мрамор	78,4	30—40	630	6	A400/320	12,5	M3	0,24·10 <sup>-3</sup>
Аргиллит	39,2—49	52	800	7	A800/630	12,5	M50	0,61·10 <sup>-3</sup>
Уголь	9,8—19,6	52	800	7	A800/630	12,5	M50	0,97·10 <sup>-3</sup>
Лабродорит	117,6—156,8	25—30	630	6	A320/250	12,5	X	0,05·10 <sup>-3</sup>
Гранит	176,4—196	40	800	7	A630/500	12,5	M50	0,07·10 <sup>-3</sup>
Гранит	137,2—245	25—30	630	6	A320/250	12,5	MЖ	0,03·10 <sup>-3</sup>
								0,05·10 <sup>-3</sup>

повлен на комбинированном исполнительном органе породопроходческого комбайна в комплексе со щелевым отрывником. Такая компоновка позволяла прорезать в массиве щель на полную глубину, равную диаметру диска, тогда как для остальных случаев, приведенных в табл. 5, из-за наличия фланца, закрепляющего диск на приводном валу, глубина резания не превышала  $\frac{1}{3}$  диаметра диска. Кроме того, диск исполнительного органа породопроходческого комбайна имел большие по величине межсегментные расстояния, чем предусмотрено ГОСТом, что увеличивает производительность при резании пород средней крепости.

Расчет возможной производительности дискового инструмента по аналогии с буровым инструментом дает завышенные результаты в сравнении с достигнутой производительностью по выражению

$$P = 0,032 \frac{h_2 K_n v_p R_{cp}}{r} \quad (42)$$

При среднем заглублинии каждого алмазного зерна на  $\frac{1}{3}$  своего диаметра для диска АОК-800 с зернистостью алмазов А800/630 и их объемной концентрацией 12,5 при скорости резания 60 м/с и глубине резания 0,2 м производительность составит 0,2 м<sup>2</sup>/с. Однако в формуле (42) учитывается не фактическое число зерен, участвующих в резании, а все зерна, которые находятся в одной линии резания рабочей поверхности инструмента. Поэтому рассчитанная по формуле (42) производительность в несколько раз превышает фактически достигнутую. Так же как и при бурении, фактическая производительность снижается с увеличением крепости горных пород.

В предыдущем параграфе показано, что на величину рациональной скорости подачи большое влияние оказывают условия выноса продуктов разрушения и коэффициент разрыхления породы. Производительность, определенная по рациональной скорости подачи, фактически достигнута лишь при резании таких пород, как песчаник, аргиллит и известняк. Резание пород с временным сопротивлением сжатию выше 78,4 МН/м<sup>2</sup> происходит, как правило, при скорости подачи ниже рациональной и, следовательно, с заниженной производительностью. Для обеспечения равной производительности разрушения песчаника и гранита требуется увеличение мощности привода, пропорциональное изменению их крепости. Так, для обеспечения производительности разрушения песчаника, равной  $0,75 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/с, диском АОК-800 потребовалась мощность в 40 кДж/с, а при резании курдайского гранита с такой же производительностью необходимая на разрушение мощность превышает 100 кДж/с. Эксперименты по резанию курдайского гранита показали, что при повышении производительности до некоторого значения за счет увеличения скорости подачи и глубины резания происхо-

дит интенсивное выделение тепла в зоне контакта инструмента с породой. Высокая температура вызывает графитизацию алмазов, следствием чего является увеличение износа инструмента. Следовательно, обеспечение высокой производительности при режимах резания, максимально использующих режущую способность рабочей поверхности алмазного инструмента, при разрушении крепких пород возможно только с учетом механических свойств пород.

Работа полосовых пил характеризуется относительно низкими скоростями резания — порядка 0,5—1,5 м/с. Конструктивные возможности машин, оснащенных полосовыми пилами, в целом ряде технологических процессов являются более рациональными, чем дисковыми. О практически достигнутой производительности алмазных полосовых пил при резании различных пород можно судить по данным табл. 6.

Таблица 6

Производительность резания горных пород алмазными полосовыми пилами

Породы	Временное сопротивление одноосному сжатию, МН/м <sup>2</sup>	Скорость подачи, мм/с	Толщина пилы, мм	Характеристика алмазного слоя			Производительность резания, м <sup>2</sup> /с
				зернистость	объемная концентрация, %	тип связки	
Песчаник	49,0—58,8	0,22	5	A800/630	25	M50	0,04·10 <sup>-2</sup>
Известняк	49,0—58,8	0,14	5	A630/500	25	M1	0,03·10 <sup>-2</sup>
Мрамор	78,4	0,07—0,08	5	A630/500	25	M1	0,01·10 <sup>-2</sup>
Мрамор	98,0	0,03	5	A400/320	12,5	M3	0,006·10 <sup>-2</sup>
Гранит	196,0	0,03	6	A630/500	25	M50, M53	0,006·10 <sup>-2</sup>
Гранит	176,4	0,02	6	A400/320	12,5	MЖ	0,004·10 <sup>-2</sup>

Примечание. Длина рабочей части пилы составляет 2500 мм.

Значительно меньшая производительность полосовых пил по сравнению с дисковым инструментом объясняется более низкой скоростью резания и худшими условиями выноса продуктов разрушения. Фактическая производительность полосовых пил, как и в рассмотренных выше случаях, меньше теоретически возможной при максимальном использовании разрушающей способности рабочей поверхности.

Теоретически возможная производительность полосовой пилы рассчитывается по формуле

$$P = \frac{0,45 \cdot 10^{-2} h_a l_b \left(1 - \frac{l_{\pi}}{l_{\text{ср}} + l_{\pi}}\right) K_0 v_p}{r} \quad (43)$$

В этом случае длина контакта инструмента с породой совпадает с длиной распиливаемого блока породы за вычетом промежутков между алмазными брусками. Принимая скорость резания 1 м/с, длину блока 2 м, зернистость алмазов А800/630, их концентрацию 12,5%, при заглаблении алмазов на 0,16 мм, получим производительность одной пилы  $2,72 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/с. Эта производительность получена для случая, когда длина промежутков между алмазными брусками составляет 40% длины  $l_{бр} + l_{п}$ . Фактическая производительность (см. табл. 6) примерно в 100 раз меньше теоретически возможной. Достижению последней на практике препятствуют не только разновысотность алмазных зерен и необходимость непрерывного и полного удаления продуктов разрушения из зоны резания. Существенными ограничивающими факторами являются жесткость полотна штрипсовой пилы и износостойкость алмазных брусков.

Производительность полосовых пил с увеличением крепости горных пород снижается. Низкая скорость резания и худшие условия удаления продуктов разрушения вызывают необходимость компенсировать эти недостатки большим усилием подачи. При этом контактные давления на алмазные зерна возрастают и при более интенсивном истирающем воздействии продуктов разрушения на связку приводят к увеличению износа и выпадению еще работоспособных алмазов. Существующие конструкции пил по условиям их жесткости и прочности допускают воздействие ограниченных нагрузок, превышение которых вызывает искривление полотна пилы, его деформацию и поломку. При распиловке стремятся уменьшить толщину пропила, поэтому увеличение прочности пилы за счет большей толщины полотна неэкономично.

Как уже отмечалось, сопоставление производительности различных типов алмазных инструментов и сравнение эффективности использования затрудняются различием в критериях их оценки. В этой связи целесообразно применить общий критерий, который учитывал бы объем разрушенной породы и величину рабочей поверхности режущего инструмента. В качестве такого критерия удобно принять относительную производительность, т. е. производительность, отнесенную к площади рабочей поверхности инструмента. Относительная производительность согласно определению рассчитывается по формулам:

для коронок, разрушающих забой выбуриванием керна,

$$P_o = \frac{0,5 (R_n^2 - R_{вн}^2) v_n}{\pi R_{ср} \left( 1 - \frac{l_n}{l_c + l_n} \right) (R_n - R_{вн})}; \quad (44)$$

для дисков со сплошной и прерывистой (сегментной) кромкой соответственно

Оносительная производительность разбуш: на горюх порош алазы 4 инструментом

Породы	Времяное соотношение односторонне скатлю, мН/м²	Абразивность, мг	Марка инструмента	Площадь рабочей поверхности инструмента, м²	Средняя скорость резания, м/с	Характеристика алмазосодержащего слоя		Относительная производительность, м³/с
						зернистость	концентрация, %	
Аргиллиты, алевролиты	39,2—49,0	6—10	Долото ДР-188-С	4·10 <sup>-2</sup>	2	8—10 шт./кар	—	0,025·10 <sup>-2</sup>
Песчаник	39,2—49,0	10	МДР-188-Т1	5·10 <sup>-2</sup>	2	8—10 шт./кар	—	0,019·10 <sup>-2</sup>
Песчаник	68,6—78,4	28	Долото ПСМ-116	1,5·10 <sup>-2</sup>	1,4	«Славутич»	—	0,018·10 <sup>-2</sup>
Песчаник	68,6—78,4	35	ПАГК-46	0,09·10 <sup>-2</sup>	3	А1000/800	25	0,42·10 <sup>-2</sup>
Песчаник	68,6—78,4	35	ПАГК-46	0,09·10 <sup>-2</sup>	7,5	А1000/800	25	1,0·10 <sup>-2</sup>
Гранит	117,6—137,2	45	АВК-46	0,08·10 <sup>-2</sup>	3,7	А800/630	25	0,06·10 <sup>-2</sup>
Гранит	137,2—156,8	50	АВК-76	0,13·10 <sup>-2</sup>	2	А630/500	25	0,05·10 <sup>-2</sup>
Уголь	9,8—19,6	1—3	Диск АOK-800	1,5·10 <sup>-2</sup>	52	А800/630	12,5	0,37·10 <sup>-2</sup>
Известняк	29,4	6	Диск АOK-630	0,11·10 <sup>-2</sup>	30—40	А400/320	12,5	0,19·10 <sup>-2</sup>
Аргиллит	39,2—49,0	6	Диск АOK-800	1,5·10 <sup>-2</sup>	62	А800/630	12,5	0,23·10 <sup>-2</sup>
Доломит	49,0	6	Диск АOK-800	0,11·10 <sup>-2</sup>	30—40	А400/320	12,5	0,13·10 <sup>-2</sup>
Песчаник	68,6—78,4	25	Диск АOK-800	1,5·10 <sup>-2</sup>	60	А800/630	12,5	0,28·10 <sup>-2</sup>
Лабродорит	117,6—156,8	35	Диск АOK-630	0,11·10 <sup>-2</sup>	25—30	А320/250	12,5	0,035·10 <sup>-2</sup>
Гранит	176,4—196,0	30	Диск АOK-800	1,5·10 <sup>-2</sup>	40	А630/500	12,5	0,025·10 <sup>-2</sup>
Гранит	137,2—245,0	50	Диск АOK-630	0,11·10 <sup>-2</sup>	25—30	А320/250	12,5	0,037·10 <sup>-2</sup>
Песчаник	49,0—58,8	25	То же	0,6·10 <sup>-2</sup>	0,5	А800/630	25	0,024·10 <sup>-2</sup>
Известняк	49,0—58,8	6	»	0,6·10 <sup>-2</sup>	0,5	А630/500	25	0,013·10 <sup>-2</sup>
Мрамор	78,4	6	»	0,6·10 <sup>-2</sup>	0,5	А630/500	25	0,005·10 <sup>-2</sup>
Гранит	196,0	50	»	0,6·10 <sup>-2</sup>	0,5	А630/500	25	0,005·10 <sup>-2</sup>

$$P_0 = \frac{0,16 H v_n b_{\text{из}}}{Rb} \quad \text{и} \quad P_n = \frac{0,16 H v_n b_{\text{из}}}{R \left(1 - \frac{l_n}{l_c + l_n}\right) b}; \quad (45)$$

для полосовых пил, оснащенных алмазными брусками,

$$P_0 = \frac{v_n l_6 b_{\text{из}}}{l_6 \left(1 - \frac{l_n}{l_6 + l_n}\right) b}. \quad (46)$$

По приведенным формулам для наиболее распространенных алмазных долот, коронок, дисков и полосовых пил произведены расчеты относительной производительности разрушения с учетом достигнутых скоростей подачи по различным горным породам (табл. 7).

Приведенные данные относятся только к производительности по чистому времени разрушения и не учитывают время, затрачиваемое на подготовительно-заключительные операции и на необходимые технологические остановки в процессе работы. Эти результаты позволяют судить о степени использования разрушающей способности рабочей поверхности различного алмазного инструмента. Наиболее высокая относительная производительность получена при разрушении пород средней крепости алмазными коронками, что объясняется малой величиной рабочей поверхности, находящейся непрерывно в контакте с забоем, при сравнительно высокой скорости резания. Долота не могут обеспечить такую производительность, так как алмазные зерна центральной части инструмента работают в неблагоприятных условиях. Кроме того, приведенные в табл. 7 данные по долотам относятся к бурению скважин на глубину 300—500 м, где условия выноса продуктов разрушения сильно осложнены. Алмазное бурение скважин по тем же породам на малых глубинах дает более высокую производительность.

Относительная производительность алмазных полосовых пил не превышает  $0,37 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^3/\text{с}}{\text{м}^2}$ . Причина этого заключается в низкой скорости резания, плохом удалении продуктов разрушения из зоны резания и в необходимости занижения скорости подачи из-за невысокой жесткости полотна пилы. Повышение скорости резания до величины, имеющей место у дискового инструмента, и более интенсивное удаление продуктов разрушения позволяют рассматривать такой инструмент как наиболее производительный. Это подтверждается относительной производительностью дискового инструмента, разрушающего породу со скоростями резания 20—60 м/с при сравнительно хороших условиях выноса продуктов разрушения из щели. Однако по технологическим причинам условия эксплуатации дисков определяют в большинстве случаев активное использова-

ние только  $\frac{1}{5}$  его рабочей поверхности. Лишь у специального диска исполнительного органа породопроходческого комбайна отрывного действия в процессе работы площадь контакта с массивом составляет 50% рабочей поверхности и поэтому имеет самую высокую относительную производительность среди дисковых алмазных инструментов.

Анализ данных табл. 7 показывает, что для всех типов инструментов наблюдается закономерное снижение относительной производительности с увеличением прочности пород; это обусловлено изменением геометрии рабочей поверхности под влиянием свойств горных пород. Стойкость инструмента оказывает большое влияние на себестоимость алмазного разрушения поэтому производительность инструмента должна выбираться с учетом этого эксплуатационного показателя.

## СИЛОВЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ

### § 1. МОЩНОСТЬ, СИЛЫ РЕЗАНИЯ И ПОДАЧИ

В силу особенностей геометрии рабочей поверхности алмазного инструмента разрушающая нагрузка распределяется между участвующими в резании алмазными зернами по всей поверхности контакта инструмента с породой. На рис. 27 показана схема воздействия на забой суммарной разрушающей нагрузки при резании породы алмазным режущим диском. Суммарную силу  $F_c$  можно разложить на составляющие в зависимости от технологической функции изучаемых процессов.

Процесс разрушения можно рассматривать в два этапа. Чтобы разрушить определенный объем породы, алмазные зерна должны внедряться в породу на некоторую глубину, а затем, перемещаясь параллельно поверхности забоя, отделять стружку. Для отделения стружки требуется определенная сила резания, направление которой совпадает с направлением скорости резания. При прорезании щели в массиве породы дисковым инструментом эта сила будет касательной к рабочей поверхности. Суммарная сила от действия всех зерен обозначена  $F_k$  (см. рис. 27), а перпендикулярная ей сила —  $F_{рад}$ . Последняя обеспечивает внедрение алмазных зерен в поверхность забоя на заданную глубину. Если при прорезании щели в массиве породы алмазный диск перемещать параллельно забою, то необходимо приложить силы, преодолевающие сопротивление этому перемещению и препятствующие выталкиванию диска из щели. Поэтому силу  $F_c$  можно разложить на две составляющие: силу подачи  $F_n$ , параллельную направлению перемещения диска, и перпендикулярную ей силу отжима  $F_o$ .

В зоне контакта инструмента с породой происходит отделение стружки алмазами с последующим выносом продуктов разрушения, при этом необходимо преодолеть силу инерции порока частиц породы и силу трения продуктов разрушения о поверхность забоя. При определенных режимах резания возможно также непосредственное воздействие поверхности связи на забой, вызывающее между связкой и забоем дополнительную силу трения. Так как эти процессы создают дополнительное перемещение инструмента, то необходимо приложить к инструменту соответствующие силы, чтобы обеспечить разрушение

породы. Тогда общую силу резания можно записать в виде уравнения

$$F_{p,i} = F_{p,z} + F_{н} + F_{тр}, \text{ Н}, \quad (47)$$

где  $F_{p,z}$  — сила резания породы всеми алмазными зернами, Н;  $F_{н}$  — сила, необходимая для выноса продуктов разрушения из зоны резания, Н;  $F_{тр}$  — сила трения продуктов разрушения и связки о забой, Н.

Ранее отмечалось, что  $F_{p,z}$  представляет собой сумму сил резания породы единичными алмазными зернами. Сила резания  $F_{p,z}$  (рис. 28) и нормальная ей сила  $F_{з,п}$ , которые определяют величину и направление результирующей силы воздействия единичного алмазного зерна на породу. На мощность резания влияет только  $F_{з,р}$ , а  $F_{з,п}$  необходима для удержания алмазного зерна на заданной глубине резания.

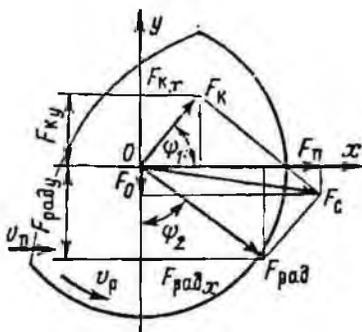


Рис. 27. Схема воздействия на забой суммарной разрушающей нагрузки

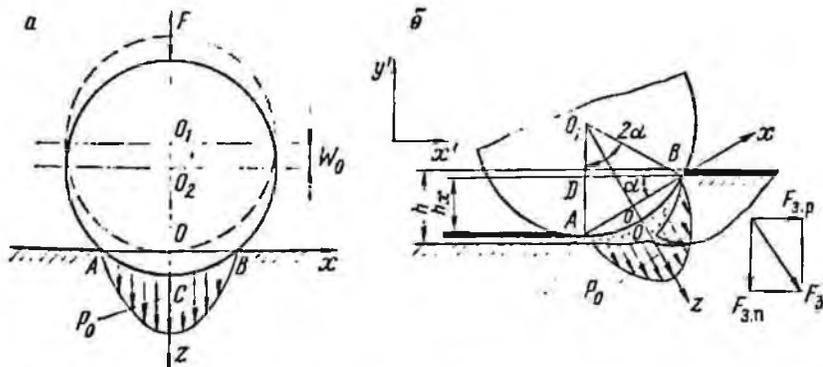


Рис. 28. Механизм взаимодействия единичного алмазного зерна с массивом: а — в начале резания; б — при отделении элемента стружки

Предположим, что в центре диска  $O$  действуют противоположно направленные силы, равные по величине единичным силам  $F_{з,р_1}$  и  $F_{з,р_2}$  и соответственно параллельные им. Тогда получим две пары сил, создающих суммарный крутящий момент относительно центра диска, который равен алгебраической сумме моментов этих сил. В общем случае при  $n$  режущих зернах имеем

$$M_{\text{сум}} = R \sum_{i=1}^{i=n} F_i = R(F_{z.p_1} + F_{z.p_2} + \dots + F_{z.p_n}), \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (48)$$

Алгебраическая сумма единичных сил в выражении (48) есть суммарная сила резания, воспринимаемая алмазным диском в процессе разрушения породы.

Определение единичных сил, действующих на алмазное зерно, выполнено с учетом взаимодействия алмазного зерна радиусом  $r$  с породным массивом, представляющим собой с точки зрения классической теории упругости плоское полупространство [26].

Формулы для расчета единичных сил имеют вид:

$$F_{z.p_i} = 1 \cdot 10^n \xi P_K h_{z_i} \{ (r h_{z_i})^{1/2} + f_{\tau p} [r(2r - h_{z_i})]^{1/2} \}, \text{ Н}; \quad (49)$$

$$F_{a.p_i} = 1 \cdot 10^n \xi P_K h_{z_i} [r(2r - h_{z_i})]^{1/2}, \text{ Н}, \quad (50)$$

где  $P_K$  — контактная прочность горных пород,  $\text{МН}/\text{м}^2$ .

Коэффициент  $\xi$  для различных горных пород в рассмотренном диапазоне изменения контактной прочности изменяется незначительно (наибольшее отклонение от среднего значения не превышает 7,8%), и его можно для расчетов принимать постоянным и равным 0,47.

Преобразуя (49) и учитывая (27), получим

$$F_{z.p_i} = 1 \cdot 10^n \xi P_K r^2 \lambda \sin^{1/2} \varphi [(\lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2} + f_{\tau p} (2 - \lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2}]. \quad (51)$$

Несмотря на зависимость единичных сил от угла  $\varphi$  поворота диска, т.е. от положения алмазного зерна на диске, сумма всех сил, воспринимаемых алмазными зернами при резании на постоянных режимах, с течением времени не изменяется. Она будет оставаться постоянной при  $H = \text{const}$  до тех пор, пока не изменятся режимы работы инструмента ( $\lambda$ ) или физико-механические свойства породы ( $P_K$ ).

Согласно (51) единичные силы находятся в сложной зависимости от параметра  $\varphi$ , поэтому их сумму необходимо определить интегрированием по этому параметру. Так как число зерен, участвующих в резании, конечно, то функция (51) дискретная и для интегрирования ее необходимо преобразовать. Воспользуемся для этой цели следующим приемом. Условимся считать

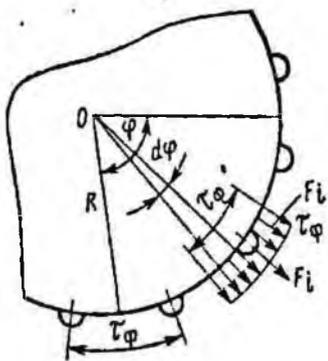


Рис. 29. Схема к определению действующей силы на элемент дуги контакта

единичную силу  $F_i$  (рис. 29) распределенной на отрезке  $\tau_\phi$ , равном с учетом (15) фактическому расстоянию между зернами, участвующими в резании, т. е.

$$\tau_\phi = 14,8 r \left( \frac{v_p}{K_0 C_1 v_n \sin \varphi} \right)^{1/2}, \text{ м.} \quad (52)$$

Тогда элементарная сила, действующая на дуге  $d\varphi$ , равна

$$dF = 0,067 F_i \frac{R}{r} \left( \frac{v_n K_0 C_1 \sin \varphi}{v_p} \right)^{1/2} d\varphi, \text{ Н.} \quad (53)$$

Подставим вместо  $F_i$  единичную силу по (51), предварительно заменив  $\lambda$  перед квадратной скобкой его значением, и проинтегрировав полученную функцию в пределах от 0 до  $\varphi$ , получим формулу для определения силы резания, действующей на алмазные зерна, расположенные на дуге  $R\varphi$  в одной линии резания, т. е.

$$F_{pл} = 1 \cdot 10^6 \frac{\xi P_{kr} R v_n}{v_p} \left[ \lambda^{1/2} \int_0^\varphi \sin^{1/2} \varphi \times \right. \\ \left. \times d\varphi + f_{тр} \int_0^\varphi (2 - \lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2} \sin \varphi d\varphi \right]. \quad (54)$$

Выполнив необходимые математические преобразования, получим

$$F_{pл} = 1 \cdot 10^6 \frac{\xi P_{kr} R v_n}{v_p} [0,64 \lambda^{1/2} (\varphi - 0,29 \sin 2\varphi - \\ - 0,006 \sin 4\varphi) + 1,41 f_{тр} (1 - \cos \varphi - 0,15 \lambda \varphi + \\ + 0,05 \lambda \varphi \sin 2\varphi)], \text{ Н.} \quad (55)$$

Введем следующие обозначения:

$$K_1 = 0,64 \lambda^{1/2} (\varphi - 0,29 \sin 2\varphi - 0,006 \sin 4\varphi); \quad (56)$$

$$K_2 = 1,41 (1 - \cos \varphi - 0,15 \lambda \varphi + 0,05 \lambda \varphi \sin 2\varphi). \quad (57)$$

Тогда с учетом (56) и (57) выражение (55) примет вид

$$F_{pл} = 1 \cdot 10^6 K_p \frac{\xi P_{kr} R v_n}{v_p}, \text{ м,} \quad (58)$$

где  $K_p = K_1 + f_{тр} K_2$ .

Формула (58) дает возможность рассчитать силу резания, действующую на алмазные зерна, расположенные в одной линии резания на длине дуги, равной  $R\varphi$ . Для определения суммарной силы резания на алмазном диске шириной  $b$  необходимо знать число линий резания. С этой целью воспользуемся выражениями (15) и (16) для определения фактических чисел зерен на линии и на поверхности контакта диска с породой. Очевидно, что число линий резания  $m$  на алмазном диске опре-

делится отношением  $n, \varphi$  и  $n_1 \varphi$ ; тогда суммарная сила резания, воспринимаемая алмазными зернами в процессе разрушения,

$$F_{\text{вр}} = 0,5 \cdot 10^8 K_p \frac{\xi P_k R b v_n}{v_p}, \text{ Н.} \quad (59)$$

Из формулы (59) видно, что суммарная сила резания прямо пропорциональна контактной прочности разрушаемой породы, ширине и радиусу диска и находится в сложной зависимости от скорости подачи, скорости резания и глубины резания (угла поворота диска), так как три последних параметра входят в коэффициент  $K_p$ . С увеличением скорости подачи и глубины силы резания увеличиваются, а с ростом скорости резания уменьшаются.

Мощность резания может быть рассчитана по формуле

$$N_{\text{рв}} = 0,49 \cdot 10^3 K_p \xi P_k R b v_n, \text{ кВт.} \quad (60)$$

Как видно из полученных зависимостей, наибольшую трудность при их использовании представляет расчет коэффициента  $K_p$ .

Расчет коэффициента  $K_p$  был выполнен с помощью ЭВМ в зависимости от глубины резания  $H$  (угла  $\varphi$  контакта алмазного диска с породой) и отношения  $v_n/v_p$  (табл. 8).

91 Таблица 8

Значения коэффициента  $K_p$

Отношение $v_n/v_p$	Угол контакта алмазного диска, рад					
	0,72	0,89	1,05	1,19	1,57	3,14
	Глубина резания (радиус диска $R=400$ мм), мм					
	100	150	200	250	400	800
$0,21 \cdot 10^{-3}$	0,188	0,276	0,359	0,454	0,724	1,450
$0,28 \cdot 10^{-3}$	0,192	0,282	0,372	0,464	0,741	1,480
$0,42 \cdot 10^{-3}$	0,201	0,292	0,386	0,481	0,767	1,540
$0,56 \cdot 10^{-3}$	0,205	0,299	0,394	0,491	0,786	1,570
$0,69 \cdot 10^{-3}$	0,214	0,305	0,402	0,500	0,801	1,600
$1,04 \cdot 10^{-3}$	0,218	0,319	0,418	0,520	0,835	1,670
$1,39 \cdot 10^{-3}$	0,225	0,325	0,431	0,587	0,860	1,720

Из табл. 8 видно, что с увеличением отношения  $v_n/v_p$  или глубины резания коэффициент  $K_p$  возрастает, причем изменение глубины на росте коэффициента  $K_p$  сказывается в значительно большей степени. Так, при увеличении отношения  $v_n/v_p$  от  $0,21 \cdot 10^{-3}$  до  $1,39 \cdot 10^{-3}$ , т.е. в 6,6 раза, коэффициент  $K_p$  возрастает всего на 16% для всех глубин резания, тогда как в зависимости от глубины резания он увеличивается практически пропорционально для всех соотношений  $v_n/v_p$ .

При определении мощности, необходимой на вынос продуктов разрушения из зоны резания, сделаем допущение, что скорость частиц разрушенной породы на выходе из щели равна скорости резания. На самом деле, как показали наблюдения за процессом разрушения [18], скорость потока штыба в зоне разрушения несколько меньше скорости резания. По этой причине принятое допущение предопределяет некоторое завышение мощности, затрачиваемой на вынос продуктов разрушения из щели.

Искомая мощность может быть определена по затратам кинетической энергии, сообщаемой разрушенному объему в единицу времени. Из рис. 20 видно, что объем разрушенной породы определяется глубиной резания  $H$ , перемещением диска в направлении подачи, шириной реза  $b_p$ , временем поворота диска на угол  $\varphi$ . Перемещение диска в направлении подачи, отнесенное ко времени поворота диска, равно скорости подачи, и формула для определения мощности, затрачиваемой на вынос продуктов разрушения из зоны резания без учета трения частиц разрушенной породы, определится из выражения

$$N_{\text{н}} = 0,49 \frac{v_{\text{н}} H b \gamma v_p^2}{g}, \text{ кВт}, \quad (61)$$

где  $\gamma$  — плотность породы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Суммарная сила, которую необходимо приложить к разрушенной породе для выноса ее из зоны резания, согласно формуле (61) равна

$$F_{\text{н}} = 0,5 \cdot 10^3 \frac{v_{\text{н}} H b \gamma v_p^2}{g}, \text{ Н}. \quad (62)$$

Следовательно, сила  $F_{\text{н}}$  зависит от режимов резания, удельного веса разрушаемой породы и ширины прорезаемой щели. Физический смысл возникновения силы  $F_{\text{н}}$  заключается в том, что частицам разрушенной породы, обладающим инерцией покоя, для выноса их из щели необходимо сообщить скорость, близкую по величине скорости резания. Алмазный диск своей рабочей поверхностью воздействует на каждую частицу разрушенной породы с некоторой силой, сообщаящей ей требуемую скорость и направление. Сумма всех этих сил и составляет величину  $F_{\text{н}}$ , которая, однако, не учитывает трения частиц породы друг о друга, о поверхность забоя и о поверхность связи.

Для определения силы трения примем следующие допущения: коэффициент трения связки инструмента о поверхность горной породы в процессе резания не изменяется; при резании температура в зоне контакта существенно не изменяет физико-механических свойств горной породы; нормальные давления в зоне контакта инструмента с породой распределяются равномерно.

Изменение коэффициента трения одной поверхности о другую наблюдается при увеличении или уменьшении скорости относительного перемещения и нормального давления [21]. Однако аналитическая связь между этими величинами не установлена и применительно к разрушению горных пород в широком диапазоне скоростей резания и давлений коэффициент трения изменяется незначительно [13, 26]. Поэтому в нашем случае в первом приближении постоянство коэффициента трения можно считать правомерным. Известно [13], что в процессе абразивного разрушения горных пород и металлов возникают высокие контактные температуры, в результате которых могут существенно меняться физико-механические свойства разрушаемого материала и инструмента. Для уменьшения этой температуры в процессе работы инструмента зона разрушения интенсивно охлаждается. Охлаждающий агент снижает температуру породы и инструмента, возникающую в результате отделения стружки алмазными зёрнами и под действием сил трения.

Алмазные зёрна и связка обладают в несколько раз большим коэффициентом теплопроводности, чем порода, что способствует быстрому отводу тепла из зоны резания. Все это позволяет считать, что влиянием температуры на силу трения можно пренебречь. Так как сила трения алмазных зёрен о породу входит как составная часть силы резания, определяемой в процессе разрушения формулой (59), то при определении силы трения продуктов разрушения о связку в расчет следует принимать только силу, возникающую при взаимодействии поверхности связки с продуктами разрушения и забоем. Эта сила является следствием нормального давления поверхности связки на продукты разрушения, находящиеся между связкой и забоем. Величина нормального давления зависит от условия распределения продуктов разрушения в зоне контакта инструмента с породой, режимов резания, физико-механических свойств породы и других факторов. Распределение нормального давления по поверхности контакта инструмента с породой для упрощения задачи можно принять равномерным и пользоваться средней силой нормального давления. Тогда силу трения связки о породу и продукты разрушения можно представить в виде

$$F_{\text{тр}} = 1 \cdot 10^6 R_{\text{т}} C_1 b f_{\text{св}} P_{\text{уд}}, \text{ Н} \quad (63)$$

где  $f_{\text{св}}$  — коэффициент трения связки о породу;  $P_{\text{уд}}$  — давление поверхности связки на забой,  $\text{МН/м}^2$ .

Сила трения прямо пропорциональна площади контакта инструмента с породой, коэффициенту трения и удельному давлению поверхности связки на забой, которое зависит от режимов резания.

Мощность, расходуемая на трение, определится, как

$$N_{\text{тр}} = 1 \cdot 10^3 R_{\text{т}} C_1 b f_{\text{св}} P_{\text{уд}} v_{\text{д}}, \text{ кВт} \quad (64)$$

Аналитическое определение зависимости  $f_{св}$  от режимов резания невозможно без знания закономерностей распределения продуктов разрушения в зоне резания, транспортирующей способности рабочей поверхности диска, влияния охлаждения и т.п. С изменением режимов резания  $P_{уд}$  не остается постоянным. Увеличение скорости подачи приводит к уменьшению расстояния между поверхностью связки и забоем, что влечет за собой увеличение силы нормального давления и, следовательно,  $P_{уд}$ . Последнее зависит, таким образом, от количества продуктов разрушения, находящихся в зоне контакта инструмента с породой, и от величины зазора между поверхностями связки и забоя. Очевидно, что глубина и скорость резания также влияют на величину  $P_{уд}$ , так как увеличение глубины вызывает рост объема разрушенной породы при постоянном зазоре между связкой и забоем, а увеличение скорости резания уменьшает этот объем. Можно установить эмпирическую зависимость  $P_{уд}$  от режимных факторов, но для этого необходимо экспериментально определить влияние скорости подачи и глубины резания на силу трения. Сила трения определяется из соотношения (47).

Суммарная мощность резания, таким образом, может быть найдена по формуле

$$N_{р.с} = 1 \cdot 10^3 Rb (0,49 K_p \xi P_k v_n + C_1 \varphi f_{св} P_{уд} v_p) + 0,49 \frac{v_n Hb \gamma v_p^2}{g}, \text{ кВт.} \quad (65)$$

Сила подачи и отжимающая сила (см. рис. 27) могут быть найдены как сумма проекций на оси координат  $x$  и  $y$  суммарных касательной  $F_k$  и радиальной  $F_{рад}$  реакций диска, т.е.

$$F_{п} = F_{kx} + F_{радx}, \quad F_{от} = F_{ky} + F_{рады}.$$

Методика определения сил  $F_k$  и  $F_{рад}$  принципиально аналогична методике расчета силы резания. Некоторое отличие состоит в том, что поскольку силы  $F_k$  и  $F_{рад}$  являются геометрическими суммами единичных сил (см. рис. 28), то для их нахождения необходимо единичные силы разложить на составляющие по осям координат. Затем, применяя описанный выше прием (см. рис. 29), определить проекции  $F_k$  и  $F_{рад}$  на оси  $x$  и  $y$  как интегральные суммы соответствующих проекций единичных сил  $F_{з.рi}$  и  $F_{з.пi}$ .

Сумма проекций единичных сил резания из оси координат равна:

$$\sum_{i=1}^{l=n} F_{з.рi} = \int_0^{\varphi} F_{з.рi} \frac{Rd\varphi}{\tau} = \int_0^{\varphi} F_{з.пi} \cos \frac{Rd\varphi}{\tau}; \quad (66)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{z.p} v_i = \int_0^{\varphi} F_{z.p} v_i \frac{Rd\varphi}{\tau} = \int_0^{\varphi} F_{z.p} i \sin \varphi \frac{Rd\varphi}{\tau}. \quad (67)$$

Подставляя в полученные выражения (51), имеем:

$$F_{K_{xл}} = \frac{1 \cdot 10^8 \xi P_{kr} R v_{п}}{v_p} \int_0^{\varphi} [(\lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2} + f_{\tau p} (2 - \lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2}] \times \\ \times \sin \varphi \cos \varphi d\varphi, \text{ Н}; \quad (68)$$

$$F_{K_{yл}} = \frac{1 \cdot 10^8 \xi P_{kr} R v_{п}}{v_p} \int_0^{\varphi} [(\lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2} + f_{\tau p} (2 - \lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2}] \times \\ \times \sin^2 \varphi d\varphi, \text{ Н}. \quad (69)$$

Здесь  $F_{iyл}$  и  $F_{ixл}$  — проекции суммарной касательной силы, действующей на одну линию резания алмазного диска. Разбивая каждый из полученных интегралов на два и производя вычисления, получим:

$$F_{K_{xл}} = \frac{1 \cdot 10^8 \xi P_{kr} R v_{п}}{v_p} [0,045 \lambda^{1/2} \sin^{3/4} \varphi + 0,71 f_{\tau p} (\sin^2 \varphi + \\ + 0,2 \lambda \sin^{5/2} \varphi)], \text{ Н}; \quad (70)$$

$$F_{K_{yл}} = \frac{1 \cdot 10^8 \xi P_{kr} R v_{п}}{v_p} \{0,46 \lambda^{1/2} (\varphi - 0,57 \sin 2\varphi + 0,004 \sin 4\varphi) + \\ + 0,35 f_{\tau p} [(1 - 0,22 \lambda) 2\varphi - (1 - 0,27 \lambda) \sin 2\varphi]\}, \text{ Н}. \quad (71)$$

Для упрощения дальнейших рассуждений введем в полученные формулы (70) и (71) следующие обозначения:

$$K_3 = 0,045 \lambda^{1/2} \sin^{3/4} \varphi; \quad K_4 = 0,71 (\sin^2 \varphi + 0,2 \lambda \sin^{5/2} \varphi);$$

$$K_5 = 0,46 \lambda^{1/2} (\varphi - 0,57 \sin 2\varphi + 0,004 \sin 4\varphi);$$

$$K_6 = 0,35 [(1 - 0,22 \lambda) 2\varphi - (1 - 0,27 \lambda) \sin 2\varphi].$$

С учетом числа линий резания на алмажном диске найдем проекции силы  $F_{ix}$  на оси  $x$  и  $y$ , действующей на диск шириной  $b$ :

$$F_{ix} = 0,5 \cdot 10^{11} K_{Kx} \frac{\xi P_{kr} R b v_{п}}{v_p}, \text{ Н}; \quad (72)$$

$$F_{iy} = 0,5 \cdot 10^{11} K_{Ky} \frac{\xi P_{kr} R b v_{п}}{v_p}, \text{ Н}; \quad (73)$$

где  $K_{ix} = K_3 + f_{\tau p} K_4$  и  $K_{iy} = K_5 + f_{\tau p} K_6$ .

Угол  $\psi_1$ , определяющий направление действия суммарной силы  $F_k$  (см. рис. 27), равен

$$\psi_1 = \operatorname{arctg} \frac{K_{ky}}{K_{kx}}. \quad (74)$$

Тогда формула для определения  $F_k$  будет

$$F_k = 0,5 \cdot 10^6 \frac{\xi P_k R b v_{II}}{v_p} \cdot \frac{K_{ky}}{\sin \operatorname{arctg} K_{ky}/K_{kx}}. \quad (75)$$

Аналогичным образом найдем силу реакции диска, направленную по его радиусу. Имея в виду формулу (50), преобразуем формулу (51). Тогда получим

$$F_{3n} = \xi P_k r^2 \lambda \sin^{1/2} \varphi (2 - \lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2}, \text{ Н.} \quad (76)$$

Так как сила  $F_{рад}$  является геометрической суммой единичных сил  $F_{3n}$ , то ее также будем искать через проекции этих сил на оси координат, причем вначале рассуждения будем вести относительно одной линии резания:

$$F_{рад x_n} = \frac{1 \cdot 10^6 \xi P_k r R v_{II}}{v_p} \int_0^{\varphi} (2 - \lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2} \sin^2 \varphi d\varphi, \text{ Н;} \quad (77)$$

$$F_{рад y_n} = \frac{1 \cdot 10^6 \xi P_k r R v_{II}}{v_p} \int_0^{\varphi} (2 - \lambda \sin^{1/2} \varphi)^{1/2} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi, \text{ Н.} \quad (78)$$

Вычисляя интегралы формул (77) и (78) аналогично предыдущим, имеем:

$$F_{рад x_n} = \frac{1 \cdot 10^6 \xi P_k r R v_{II}}{v_p} 0,35 [(1 - 0,22\lambda) 2\varphi - (1 - 0,27\lambda) \sin 2\varphi], \text{ Н;} \quad (79)$$

$$F_{рад y_n} = \frac{1 \cdot 10^6 \xi P_k r R v_{II}}{v_p} 0,71 (\sin^2 \varphi + 0,2 \lambda \sin^{5/2} \varphi), \text{ Н.} \quad (80)$$

Переходя на диск шириной  $b$  и учитывая значения  $K_4$  и  $K_6$ , получим:

$$F_{рад x} = 0,5 \cdot 10^6 K_6 \frac{\xi P_k R b v_{II}}{v_p}, \text{ Н;} \quad (81)$$

$$F_{рад y} = 0,5 \cdot 10^6 K_4 \frac{\xi P_k R b v_{II}}{v_p}, \text{ Н.} \quad (82)$$

Угол  $\psi_2$ , определяющий направление силы  $F_{рад}$  (см. рис. 27),

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{K_6}{K_4}. \quad (83)$$

и формула для силы  $F_{рад}$  запишется в следующем виде:

$$F_{рад} = 0,5 \cdot 10^6 \frac{K_6}{\sin \operatorname{arctg} K_6/K_4}, \text{ Н.} \quad (84)$$

Сила подачи, действующая на алмазный диск в процессе разрушения породного массива, определится как

$$F_n = 0,5 \cdot 10^6 K_n \frac{\xi P_k R b v_n}{v_p}, \text{ Н}, \quad (85)$$

где  $K_n = K_{n_x} + K_b$ .

Отжимающая сила, воспринимаемая алмазным диском,

$$F_{от} = 0,5 \cdot 10^6 K_{от} \frac{\xi P_k R b v_n}{v_p}, \text{ Н}, \quad (86)$$

где  $K_{от} = K_{n_y} + K_4$ .

Анализ полученных зависимостей для определения сил подачи (85) и отжима (86) показывает их внешнее сходство с выражением для силы резания (59). Отличие состоит в коэффициентах этих сил  $K_n$ ,  $K_{от}$ ,  $K_p$ .

В табл. 9 и 10 приведены результаты расчета коэффициентов  $K_n$  и  $K_{от}$  для различных режимов работы алмазного диска.

Таблица 9

Зависимость коэффициента  $K_n$  от режимов разрушения

Отношение $v_n/v_p$	Угол контакта алмазного диска, рад					
	0,72	0,89	1,05	1,19	1,57	3,14
	Глубина резания (радиус диска $R=400$ мм), мм					
	100	150	200	250	400	800
$0,21 \cdot 10^{-3}$	0,309	0,492	0,685	0,881	1,44	2,15
$0,28 \cdot 10^{-3}$	0,312	0,496	0,681	0,884	1,45	2,16
$0,42 \cdot 10^{-3}$	0,315	0,501	0,697	0,892	1,46	2,17
$0,56 \cdot 10^{-3}$	0,320	0,505	0,701	0,897	1,46	2,18
$0,69 \cdot 10^{-3}$	0,322	0,508	0,703	0,903	1,47	2,18
$1,04 \cdot 10^{-3}$	0,327	0,515	0,717	0,912	1,48	2,19
$1,39 \cdot 10^{-3}$	0,330	0,523	0,731	0,918	1,48	2,20

Как видно из таблиц, зависимость коэффициентов  $K_n$  и  $K_{от}$  от соотношения  $v_n/v_p$  аналогична зависимости  $K_p$  от этого параметра, только она проявляется еще слабее. Так, с ростом  $v_n/v_p$  от  $0,21 \cdot 10^{-3}$  до  $1,39 \cdot 10^{-3}$  коэффициенты  $K_n$  и  $K_{от}$  увеличиваются в среднем на 5 и 11% соответственно. Причем при больших глубинах резания влияние соотношения  $v_n/v_p$  на коэффициент  $K_n$  уменьшается, а на коэффициент  $K_{от}$  — возрастает. С ростом глубины резания коэффициент  $K_n$  изменяется, так же как и  $K_p$ , практически пропорционально для всех соотношений  $v_n/v_p$ . Соотношение между коэффициентами  $K_n$  и  $K_p$  для всех режимов резания в среднем составляет 1,5 и характеризует собой отношение усилия подачи к усилию резания.

Таблица 10

Зависимость коэффициента  $K_{от}$  от режимов разрушения

Отношение $v_n/v_p$	Угол контакта алмазного диска, рад					
	0,72	0,89	1,05	1,19	1,57	3,14
	Глубина резания (радиус диска $R=400$ мм), мм					
	100	150	200	250	400	800
$0,21 \cdot 10^{-3}$	-0,230	-0,284	-0,307	-0,299	-0,197	+1,11
$0,28 \cdot 10^{-3}$	-0,230	-0,282	-0,303	-0,294	-0,184	+1,14
$0,42 \cdot 10^{-3}$	-0,227	-0,278	-0,297	-0,284	-0,163	+1,18
$0,56 \cdot 10^{-3}$	-0,227	-0,273	-0,292	-0,277	-0,147	+1,20
$0,69 \cdot 10^{-3}$	-0,225	-0,272	-0,297	-0,272	-0,135	+1,22
$1,04 \cdot 10^{-3}$	-0,223	-0,263	-0,281	-0,264	-0,107	+1,26
$1,39 \cdot 10^{-3}$	-0,221	-0,262	-0,273	-0,252	-0,088	+1,31

Порядок пользования табл. 9 и 10 аналогичен порядку, описанному выше для табл. 8. В табл. 10 коэффициент для всех принятых глубин резания, кроме  $H=800$  мм, имеет знак минус, что говорит о противоположном принятому на рис. 27 направлению силы отжима. Объясняется это тем, что при малых глубинах резания величина проекции силы  $F_{рад}$  на ось  $y$  преобладает над проекцией силы  $F_k$ , имеющей положительное направление. По мере увеличения глубины резания углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  (см. рис. 27), определяющие направление сил  $F_k$  и  $F_{рад}$ , возрастают и при некоторой глубине  $H_0$  величины проекций сил  $F_k$  и  $F_{рад}$ , имеющие противоположное направление, становятся равными по абсолютной величине. При этом коэффициент  $K_{от}$  равен нулю и отжимающая сила отсутствует.

Глубина резания  $H_0(\varphi_0)$ , при которой  $F_{от}=0$ , определяется графическим способом (рис. 30). Как видно из рисунка, значение  $H_0$  составляет при  $v_n/v_p=1,39 \cdot 10^{-3}$  около 0,43 м, а при  $v_n/v_p=0,21 \cdot 10^{-3}$  — около 0,48 м, что соответствует углам контакта диска с породой, при которых коэффициент  $K_{от}$  равен нулю; для остальных соотношений  $v_n/v_p$  эти значения находятся между найденными выше крайними значениями  $H_0$  и  $\varphi_0$ .

В соответствии с рис. 27 суммарная сила подачи  $F_{п.с}$  определяется как векторная сумма сил  $F_{п}$  и  $F_{от}$ , к которой необходимо прибавить силу давления связки на забой и продукты разрушения  $F_d=R\varphi b P_{уд}$ , тогда

$$F_{п.с} = 0,5 \cdot 10^6 K_{п.с} \frac{\xi P_k b v_n}{v_p} + 1 \cdot 10^6 R \varphi b C_1 P_{уд} \quad (87)$$

где  $K_{п.с} = (K_{п}^2 + K_{от}^2)^{1/2}$  — суммарный коэффициент режимов работы для силы подачи.

Для коронки сила трения между связкой, удерживающей алмазные зерна на рабочей поверхности, и забоем, вызывающая дополнительный расход мощности, находится в соответствии с формулой (63). В отличие от диска, вся рабочая поверх-

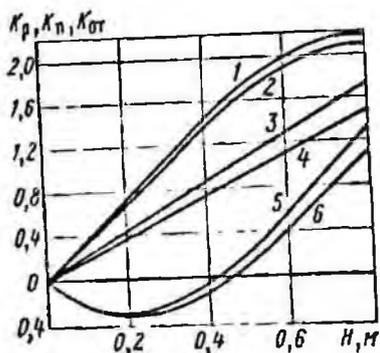


Рис. 30. Зависимости коэффициентов  $K_n$  (кривые 1, 2),  $K_p$  (кривые 3, 4) и  $K_{от}$  (кривые 5, 6) от глубины резания  $H$  при отношении  $v_n/v_p = 1,39 \cdot 10^{-3}$  (кривые 1, 3, 5) и отношении  $v_n/v_p = 0,21 \cdot 10^{-3}$  (кривые 2, 4, 6)

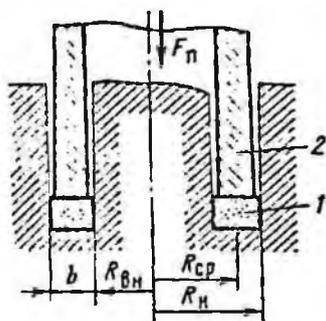


Рис. 31. Схема разрушения забоя алмазной коронкой: 1 — алмазосодержащая часть; 2 — корпус коронки

ность коронки одновременно находится в контакте с забоем, поэтому площадь контакта определяется только геометрическими параметрами коронки (рис. 31), т. е.

$$S_n = \pi (R_n^2 - R_{вн}^2) C_1, \text{ м}^2,$$

где  $R_n$ ,  $R_{вн}$  — соответственно внешний и внутренний радиусы рабочего кольца коронки, м.

Суммарные усилия резания  $F_{ск}$  и подачи  $F_{пн}$  на коронке с учетом их составляющих определяется, как

$$F_{с.н} = 1 \cdot 10^6 n_s \phi \xi P_n h_3 \{ (rh_3)^{1/2} + f_{тр} [r(2r - h_3)]^{1/2} \} + 1 \cdot 10^6 \pi f_{св} \times \\ \times P'_{уд} C_1 (R_n^2 - R_{вн}^2), \text{ Н}; \quad (88)$$

$$F_{п.н} = 1 \cdot 10^4 n_s \phi \xi P_n h_3 [n(2r - h_3)]^{1/2} + 1 \cdot 10^6 \pi P'_{уд} C_1 (R_n^2 - R_{вн}^2), \text{ Н}, \quad (89)$$

где  $P'_{уд}$  — удельное давление продуктов разрушения на рабочую поверхность коронки, МН/м<sup>2</sup>;  $f_{св}$  — коэффициент трения между связкой и продуктами разрушения.

Полная мощность, затрачиваемая на бурение, находится из выражения

$$N_6 = 1 \cdot 10^3 v_p n_s \phi \xi P_n h_3 \{ (rh_3)^{1/2} + f_{тр} [r(2r - h_3)]^{1/2} \} + 1 \cdot 10^3 v_p \pi f_{св} \times \\ \times P'_{уд} C_1 (R_n^2 - R_{вн}^2), \text{ кВт}. \quad (90)$$

По сравнению с дисковым инструментом в формуле для расчета суммарной мощности на бурение отсутствует составляющая, обусловленная необходимостью затрачивания энергии на вынос продуктов разрушения из зоны резания. Расчеты показали, что из-за сравнительно низкой скорости резания для бурового и штрипсового инструментов величина этой составляющей не превышает 0,5% суммарной мощности и ею можно пренебречь. Поскольку при неизменных режимах работы коронки величина ее заглупления  $a_k$  и толщина стружки  $h_3$ , приходящейся на каждое зерно, с течением времени не изменяются, то величина  $h_3$  не является функцией угла поворота коронки  $\varphi$ . Очевидно, что при скорости подачи  $v_{\text{п}}$  и частоте вращения коронки  $n_{\text{б}}$  толщина слоя, приходящегося на 1 рад равна  $a_k = v_{\text{п}}/n_{\text{б}}$ , а стружки, снимаемой одним зерном при повороте диска на 1 рад  $h_3 = a_k/n_{\text{б}\varphi}$ . Следовательно,

$$h_3 = \frac{v_{\text{п}}}{n_{\text{б}} n_{\text{б}\varphi}}, \text{ м.} \quad (91)$$

Используя (21), (22) и (23) и подставляя значение  $v_{\text{р}} = \pi(R_{\text{н}} + R_{\text{вн}})n_{\text{б}}$  и  $b = (R_{\text{н}} - R_{\text{вн}})$ , после преобразований получим:

$$n_{\text{б}\varphi} = 14,3 \cdot 10^{-3} \frac{(R_{\text{н}} + R_{\text{вн}}) K_0 C_1 h_3}{r^2}; \quad (92)$$

$$h_3 = 8,4r \left[ \frac{v_{\text{п}}}{(R_{\text{н}} + R_{\text{вн}}) K_0 C_1 n_{\text{б}}} \right]^{1/2}, \text{ м;} \quad (93)$$

$$n_{\text{б}\varphi} = 0,06 \frac{(R_{\text{н}}^2 - R_{\text{вн}}^2) \left[ \frac{v_{\text{п}} K_0 C_1}{(R_{\text{н}} + R_{\text{вн}}) n_{\text{б}}} \right]^{1/2}}{r^2}. \quad (94)$$

Полученная зависимость для расчета фактического числа работающих зерен на рабочей поверхности коронки справедлива только для новых коронок в начальный период работы, когда поперечное сечение алмазосодержащей части имеет прямоугольную форму и ширину рабочей поверхности, равную  $R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}$ . В установившемся длительном режиме работы поперечное сечение алмазосодержащей части претерпевает изменения в результате износа и приобретает форму, у которой рабочая поверхность округлена. Это увеличивает рабочую поверхность коронки и число зерен, участвующих в разрушении забоя, примерно на 20—25%.

Подставляя выражения (93) и (94) в (89) и (90), получим выражения для расчета силы подачи и мощности на вращение коронки:

$$F_{\text{п.в}} = 0,5 \cdot 10^6 \xi P_{\text{к}} K_{\text{п}}' \frac{(R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}) v_{\text{п}}}{n_{\text{б}}} + 1 \cdot 10^6 \pi P_{\text{уд}}' C_1 (R_{\text{н}}^2 - R_{\text{вн}}^2), \text{ Н} \quad (95)$$

$$N_G = 1 \cdot 10^3 \pi (R_n^2 - R_{nn}^2) [0,5 \xi P_n K'_p v_n + \pi f_{св} P'_{уд} n_G C_1 (R_n - R_{nn})], \text{ кВт}, \quad (96)$$

где  $K'_n = 1,41 \left\{ 1 - 4,2 \left[ \frac{v_n}{(R_n + R_{nn}) K_0 C_1 n_G} \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$  — коэффициент режимов работы для силы подачи;

$$K'_p = 2,9 \left[ \frac{v_n}{(R_n + R_{nn}) K_0 C_1 n_G} \right]^{1/4} + 1,41 f_{тp} \times \\ \times \left\{ 1 - 4,2 \left[ \frac{v_n}{(R_n + R_{nn}) K_0 C_1 n_G} \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$$

— коэффициент режимов работы для мощности бурения.

Из формул (95) и (96) видно, что силовые и энергетические показатели алмазного бурения зависят от режимов разрушения, характеристики и физико-механических свойств породы. Однако влияние их на величину показателей разрушения неодинаково. Если первое слагаемое формулы (96) прямо пропорционально скорости подачи и находится в степенной зависимости от отношения скоростей подачи и вращения коронки, то второе слагаемое прямо пропорционально только скорости вращения коронки. Как для первого, так и для второго слагаемого формулы существует прямая зависимость между их величиной, размером рабочей поверхности инструмента и физико-механическими свойствами породы. Частота вращения коронки на величину первого слагаемого для расчета мощности оказывает сложное влияние, а величина второго слагаемого изменяется прямо пропорционально. Если между мощностью, расходуемой на разрушение, и скоростью резания существует линейная зависимость, то между силой резания и площадью контакта алмазных зерен с породой — нелинейная, т. е. с увеличением частоты вращения при постоянной скорости подачи площадь контакта алмазных зерен с породой уменьшается, что связано с уменьшением усилия подачи. Анализ показывает, что с увеличением  $n_G$  в 2 раза первое слагаемое в формуле (96) уменьшается на 15%, тогда как второе слагаемое возрастает на 100%, а так как доля второго слагаемого в мощности, расходуемой на вращение коронки, составляет 50% и более [13], то в целом с увеличением скорости резания величина мощности возрастает.

Сила подачи, в отличие от мощности, расходуемой на разрушение забоя, как видно из (96), в большей мере зависит от геометрических параметров инструмента, чем от режимов бурения. Из (95), (96) видно, что снижение мощности, расходуемой на вращение коронки, и силы подачи при заданной производительности в основном достигается уменьшением площади контакта инструмента с породой и использованием большей зернистости алмазов, что позволяет увеличить скорость подачи.

С увеличением частоты вращения коронки мощность на бурение возрастает, а сила подачи снижается.

Применительно к штриповому инструменту при выводе зависимостей для расчета силовых и энергетических показателей последовательность и характер рассуждений аналогичны тем, которые сопутствовали выводу этих зависимостей для дискового инструмента и буровой коронки. К отличительным особенностям можно отнести возвратно-поступательное перемещение рабочей поверхности и направления скоростей резания и подачи.

Используя формулы по расчету силы резания и подачи на единичном алмазном зерне (49) и (50), силы трения и давления связки на забой и продукты разрушения (63) и зависимость для определения величины заглубления зерна (24), числа зерен на поверхность инструмента (26) и учитывая, что в последней формуле  $l_x$  нужно заменить на  $l_0$ , тогда в соответствии с формулой (46) получим

$$S_n = Hl_0 \left( 1 - \frac{l_n}{l_{0p} + l_n} \right).$$

После упрощения получим формулы для выражения силы подачи и мощности резания пород штриповым инструментом:

$$F_{n,ш} = 0,5 \cdot 10^9 \frac{\xi P_k l_0 b v_{ш}}{v_p} K_n^* + 1 \cdot 10^9 l_0 b P_{уд}^* C_1, \text{ Н}; \quad (97)$$

$$N_{p,ш} = 1 \cdot 10^9 l_0 b [0,5 \xi P_k v_n K_p^* + f_{св} P_{уд}^* v_p C_1], \text{ кВт}, \quad (98)$$

где  $K_n^* = 1,41 \left\{ 1 - 7,4 \left[ \frac{v_{ш}}{v_p K_p C_1} \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$  — коэффициент режимов

работы пилы для силы подачи;

$K_p^* = 3,9 \left( \frac{v_{ш}}{v_p K_0 C_1} \right)^{1/4} + 1,41 f_{тр} \times \left[ 1 - 7,4 \left( \frac{v_{ш}}{v_p K_0 C_1} \right) \right]$  — коэффициент режимов работы пилы для мощности резания.

Сравнение формул для расчета сил подачи и мощности на разрушение для дискового инструмента (87) и (65), буровой коронки (95) и (96), штриповой пилы (97) и (98) выявляет структурное сходство между ними. Влияние исходных параметров на силовые и энергетические показатели разрушения для трех типов инструмента одинаково. Это свидетельствует о сходственности процессов, происходящих в зоне контакта инструмента с породой, возможности создания единой методики расчета эксплуатационных показателей работы инструмента и установления общих критериев оценки эффективности его применения в исполнительных органах горных машин.

Для учета расстояния между брусками  $l_n$  во втором слагаемом формул (97) и (98) фигурирует множитель  $C_1$ . Из анализа этих формул видно, что при постоянной длине алмазного

бруска с увеличением расстояния между брусками сила давления связи на забой и продукты разрушения и соответствующая ей помощь трения уменьшаются. Это очевидная закономерность. Но первое слагаемое формул, которое определяет силу, необходимую для внедрения зерен в массив, и мощность, необходимую на резание забоя алмазными зернами, не зависит от расстояния между алмазными брусками. Это объясняется взаимноисключающим влиянием этого параметра на первое слагаемое формул. Если  $l_n$  увеличивается при постоянном  $l_{бр}$ , уменьшается число зерен на площади контакта инструмента с породой, что уменьшает величину первого слагаемого формул (97) и (98), но так как отношение  $v_n/v_p$  остается неизменным, на оставшиеся алмазные зерна приходится большая толщина стружки, что увеличивает величину первого слагаемого. Однако небольшое влияние этого фактора все-таки остается, так как  $l_n$  и  $l_{бр}$  входят в состав коэффициентов  $K_n^*$  и  $K_p^*$ . Расчеты показывают, что при увеличении  $l_n$  в 4 раза (с 25 до 100 мм) первые слагаемые формулы (97) уменьшатся на 1% и  $K_p^*$  увеличивается на 3% поэтому влиянием  $l_n$  на  $K_n^*$  и  $K_p^*$  можно пренебречь.

Удельные давления связи на забой и продукты разрушения  $P_{уд}$ ,  $P'_{уд}$  и  $P''_{уд}$  с изменением режимов работы дисков, коронок и полосовых пил не остаются постоянными, и интенсивность их изменения для разных типов инструмента будет различной. В связи с этим представляется целесообразным проведение экспериментальных исследований для установления зависимости удельного давления от режимов работы инструмента.

## § 2. РЕЗАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ЕДИНИЧНЫМ АЛМАЗНЫМ ЗЕРНОМ

Алмазные зерна характеризуются большими отрицательными передними углами резания, что требует значительных удельных усилий для отделения стружки. Специфика условий работы алмазного инструмента определяет малую толщину стружки, приходящейся на каждое зерно, которая, например, при использовании алмазов зернистостью А800/630 не превышает 0,1 мм, или составляет в среднем около 1/5 части радиуса зерна. С уменьшением толщины стружки наблюдается значительное увеличение отрицательного переднего угла резания, приближающегося по своей величине к 90°. В этом случае ухудшаются условия отделения стружки.

На рис. 32 показаны поверхности резов при разрушении единичным алмазным зерном различных пород. Расстояние между резами и глубина резания для всех пород были одинаковыми и соответственно равными 1,2 и 0,05 мм. Из рис. 32 видно, что независимо от разновидности породы рез имеет две зоны.

Поверхность первой зоны, которая располагается у дна бороздки, относительно ровная для всех четырех пород и почти полностью повторяет профиль сечения алмазного зерна. На этой поверхности отсутствуют следы отделения крупных элементов стружки, т. е. в этой зоне происходит тонкодисперсное дробление породы.

Поверхности второй зоны свойственны отличительные особенности в зависимости от свойств разрушаемой породы. Края реза мрамора имеют хорошо заметные следы хрупкого разрушения, соответствующие отрыву крупных элементов стружки, причем для них характерна некоторая периодичность в расположении и размерах. На песчанике края реза имеют иную конфигурацию. Участкам отделения крупных элементов стружки свойственны периодичность в расположении по величине. Форма этих участков свидетельствует об отрыве крупных элементов стружки по границам зерен материала, слагающего песчаник. Такое различие форм поверхностей разрушения при резании мрамора и песчаника объясняется следующим образом. Зерна минерала, из которого состоит коелгинский мрамор, имеют размеры от 0,0008 до 0,0013 мм, что значительно меньше глубины резания, составляющей от 0,05 до 0,1 мм, поэтому на отделение крупного элемента стружки они оказывают незначительное влияние, хотя изучение под микроскопом поверхности отделения стружки показывает, что зерна породообразующего минерала мрамора не разрушены и граница отрыва проходит по цементирующей связке. При резании песчаника, размеры зерен которого изменяются от 0,01 до 0,05 мм, т. е. являются соизмеримыми с глубиной резания, наблюдается их существенное влияние на отделение стружки. В процессе взаимодействия с массивом алмазное зерно отрывает как группы зерен, так и отдельные зерна песчаника.

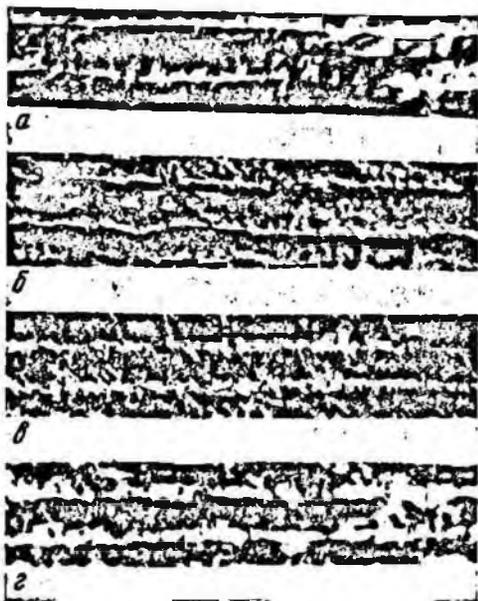


Рис. 32. Поверхности резов при разрушении единственным алмазным зерном:

а — коелгинского мрамора; б — карагандинского песчаника; в — янцевского гранита; г — шокшинского кварцита

Резы на янцевском граните также имеют две характерные зоны разрушения. Зона отрыва крупных элементов стружки характеризуется наличием повторяющихся участков. Гранит состоит из минералов, размеры зерен которых изменяются от 3 до 8 мм, что значительно больше глубины резания, поэтому зоны отрыва элементов стружки зависят от свойств этих минералов, их спайности и структуры.

Шокшинский кварцит имеет много общего с песчаником, поэтому форма поверхностей резов у них во многом аналогична. Из рис. 32 видно, что зона отрыва элементов стружки так же, как и у песчаника, характеризуется наличием участков, где происходит отделение одиночных зерен породообразующего минерала, и более крупных элементов стружки, состоящих из группы зерен.

Для более конкретного представления о процессе отделения стружки при резании породы алмазным зерном производилось фотографирование через микроскоп МП-7 отдельных этапов взаимодействия алмазного зерна с породой. При этом перед отделением крупного элемента стружки в зазор между забоем и алмазным зерном истекали тонкодисперсные продукты разрушения, формируя уплотненное ядро. Затем происходило отделение крупного элемента и более интенсивное истечение части ядра. Продукты разрушения располагаются по обеим сторонам реза. Отделенный крупный элемент стружки представлял собой зерна кварца, который является породообразующим минералом песчаника.

Более наглядное представление о процессе отделения стружки единичным зерном получено с помощью киносъемки, подтвердившей скачкообразность процесса разрушения. В начале контакта алмазное зерно отделяет от поверхности разрушаемого образца мелкие частицы, перемещая и уплотняя их в направлении своего движения (рис. 33, 1—2). Отделение мелких частиц породы происходит не плавно, а скачкообразно, при этом скорость их разлета не одинакова, а зависит от расположения относительно зерна. Те частицы, которые находятся непосредственно перед алмазным зерном по ходу его движения, имеют наибольшую скорость и, вылетая из-под зерна, ударяются в оправку перед зерном. Частицы, смещенные влево и вправо относительно оси перемещения зерна, приобретают скорость значительно меньшую и в процессе перемещения алмазного зерна вытесняются последним в сторону, образуя буртики по бокам бороздки (рис. 33, 3—4).

Истечение тонкодиспергированных продуктов разрушения из зоны резания происходит под давлением, которое возрастает по мере перемещения зерна, о чем свидетельствует рост усилий на осциллограмме до некоторой максимальной величины. При достижении усилий максимальной величины происходит отрыв крупного элемента (рис. 33, 5), что вызывает резкое умень-

шенне усилия и, следовательно, давления алмазного зерна на мелкие частицы в зоне резания. При этом истечение продуктов разрушения как перед зерном, так и в стороны значительно замедляется (рис. 33, 6—7). При дальнейшем перемещении зерна интенсивность истечения возрастает, что на киноленте сопровождается увеличением объема истекающих частиц (рис. 33, 8—14), а на осциллограмме вызывает рост усилий. Периодическое отделение крупных элементов стружки происходит подобно микровзрыву (рис. 33, 15—16), при этом крупные элементы, обладающие значительной кинетической энергией, разлетаются в стороны за пределы буртика, образованного мелкими частицами (17—21).

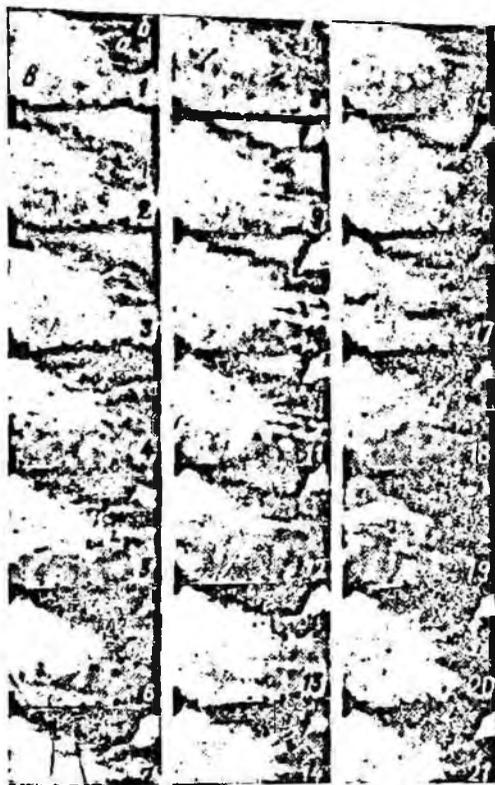


Рис. 33. Кинокадры разрушения песчаника единичным алмазным зерном:

а — алмазное зерно; б — оправка; в — разрушенный образец (направление резания справа налево)

Изучение формы бороздки под микроскопом позволило установить, что ее сечение состоит из двух частей: узкой нижней и широкой верхней, с явно выраженным боковым развалом; нижняя часть составляет от общей величины заглубления алмазного зерна в среднем около 90%.

Сравнение сечения бороздки с профилем алмазного зерна показало, что нижняя ее часть практически полностью совпадает с профилем алмазного зерна, тогда как, начиная с высоты  $h_1$ , берега бороздки расходятся и не совпадают с профилем алмазного зерна. Из этого следует, что в процессе разрушения алмазное зерно при своем заглублении, равном  $h$ , контактирует с разрушенной породой только в нижней части бороздки и максимальная высота его контакта равна  $h_1$ , что составляет 0,9 от полного заглубления  $h$ . Вторая же, верхняя часть сечения бороздки образуется за счет отрыва крупных элементов стружки, в этой ее части контакт между алмазным зерном и разрушае-

мой породой отсутствует. Берега бороздки в плане имеют неровную, «рваную» форму, что подтверждает вывод об образовании верхней части бороздки за счет отрыва крупных элементов стружки. На дне бороздки после прохода алмазного зерна оставалась тонкая прослойка, состоящая из сильно измельченных и уплотненных продуктов разрушения. Эта прослойка образована, очевидно, за счет продуктов разрушения, формирующих уплотненное ядро перед режущей частью алмазного зерна и истекающих в процессе разрушения в зазоры между зерном и массивом.

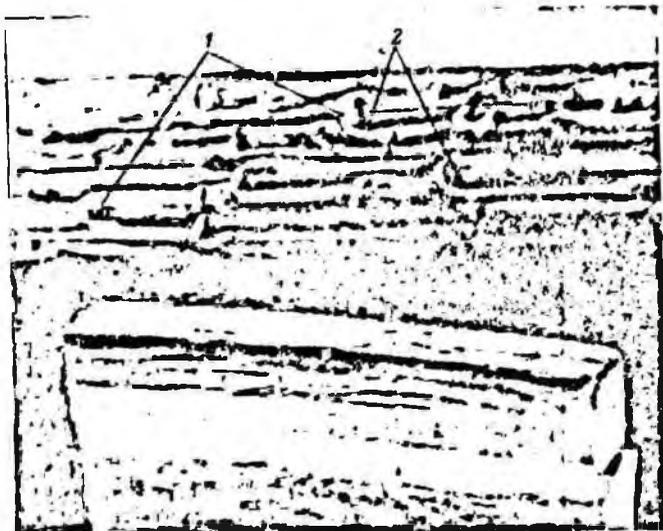


Рис. 34. Состояние рабочей поверхности алмазного сегмента

Алмазные зерна 1 (рис. 34), разрушая породу, движутся в потоке штыба, причем скорость алмазных зерен несколько больше скорости движения разрушенных частиц, которая зависит от степени их уплотненности. Такой вывод подтверждается анализом рабочей поверхности алмазного диска, где отчетливо видны характерные «хвосты» связки 2, образующиеся за каждым алмазным зерном.

Расстояние между резами, при котором происходит полное разрушение целиков породы, является оптимальным, исходя из условия минимальных удельных затрат энергии на разрушение [26]. При резании полное разрушение целиков породы между резами для глубины резания 0,1 мм происходит при расстоянии между резами  $t_p = 0,6$  мм, а для глубины резания 0,05 мм — при  $t_p = 0,3$  мм. Обычно рациональное значение расстояния между резами характеризуется отношением  $t_p/t_z$ , но из  $t_p$  необходимо

выцесь шприну контакта заглубленной в породу части зерна  $b_n$ . Тогда для глубины резания 0,05 мм это отношение равно 3,6, а для глубины резания 0,1 мм — 3,5. Следовательно, с изменением глубины резания в 2 раза оптимальное отношение для обеих пород остается примерно одинаковым.

Зависимости силы резания от заглубления алмазного зерна в породу (глубины резания), полученные экспериментально, приведены на рис. 35, из которого видно, что с изменением глубины силы резания меняются линейно. Качественный характер

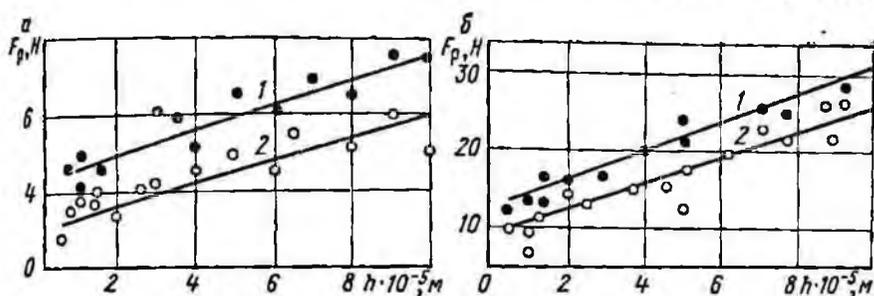


Рис. 35. Зависимости силы резания от глубины резания для: а — мрамора (1) и песчаника (2); б — кварцита (1) и гранита (2)

изменения силы резания мрамора, песчаника, гранита и кварцита примерно одинаков.

Отношение силы подачи к силе резания на протяжении опытов оставалось постоянным. Так, для песчаника, мрамора, гранита и кварцита при глубине резания 0,05 мм это отношение соответственно равно 1,4; 1,6; 1,8; 2,1. Величина  $F_{з,п}/F_{з,р}$  несколько возрастает при указанной последовательности расположения пород. Этот рост объясняется влиянием физико-механических свойств пород и для песчаника, имеющего меньше по сравнению с остальными тремя породами плотность и контактную прочность, величина  $F_{з,п}/F_{з,р}$  наименьшая, а для прочного и плотного шокшинского кварцита она наибольшая.

На рис. 36 показаны характерные осциллограммы усилий резания и подачи при разрушении образца песчаника алмазными зернами различной величины. Из осциллограмм видно, что как усилия резания, так и усилия подачи по мере перемещения зерна изменяются скачкообразно, причем независимо от величины зерна усилие подачи больше усилия резания в среднем в 1,5 раза. Величина обоих усилий по мере увеличения зернистости алмазов закономерно возрастает. На всем пути резания наблюдается соответствие в изменении усилий резания и подачи. Закономерность изменения усилий подтверждает ранее сделанный на основании анализа киноленты вывод о периодичности отделения крупных элементов стружки. Моменту отделения

крупных элементов соответствует на осциллограмме резкое снижение усилий, в некоторых случаях до нуля, чему предшествует скол мелких частиц породы. Средняя величина коэффициента динамичности разрушения составляет около 1,4.

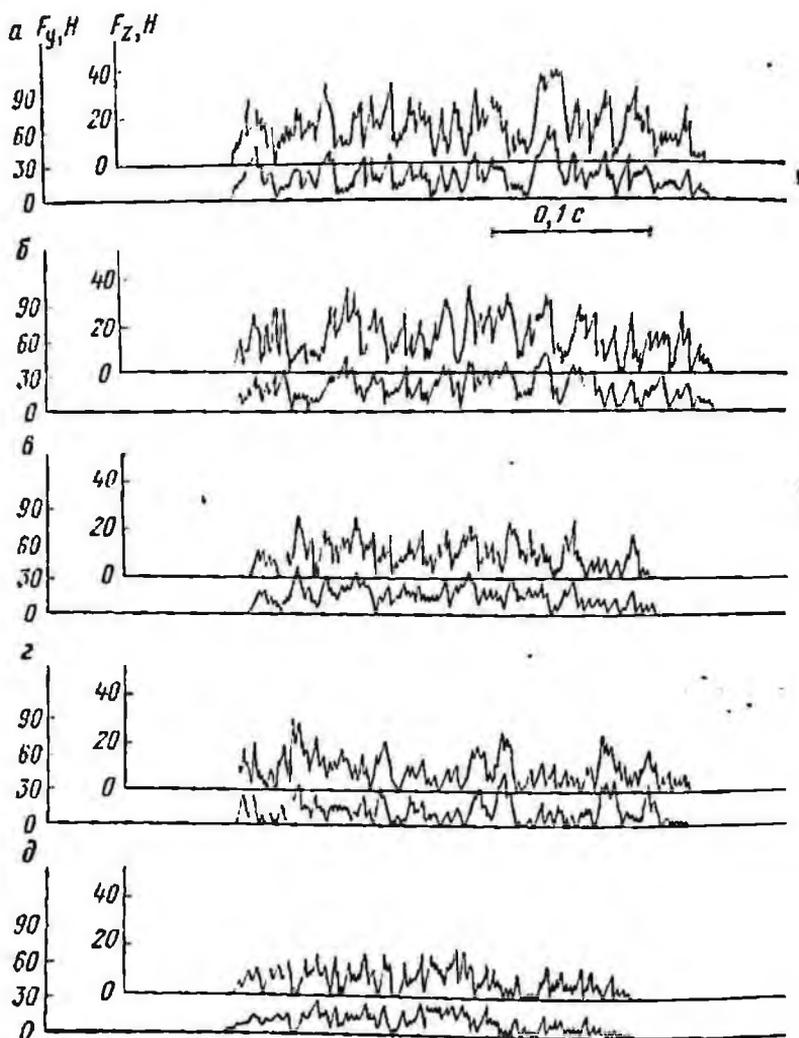


Рис. 36. Осциллограммы усилий (а—д) при резании песчаника единичными алмазными зернами диаметром соответственно 2,6; 2,06; 1,62; 0,86; 0,68 мм

По результатам замера усилий резания и подачи песчаника построены зависимости этих усилий от заглубления алмазного зерна (рис. 37). Как видно, экспериментальные и расчетные

значения усилий резания и подачи с ростом заглабления алмазного зерна возрастают по зависимости, близкой к линейной. Во всех случаях усилия подачи больше усилий резания; абсолютная разница между усилиями с ростом глубины возрастает, тогда как отношение  $F_{з.п}/F_{з.р}$  практически остается постоянным и в среднем составляет 1,5.

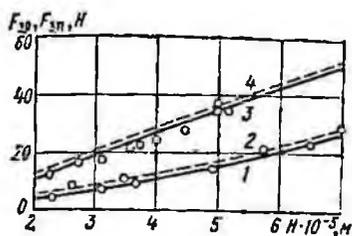


Рис. 37. Зависимости усилий соответственно резания (1, 2) и подачи (3, 4) от глубины резания алмазным зерном диаметром 2 мм (пунктирные линии построены по расчетным данным)

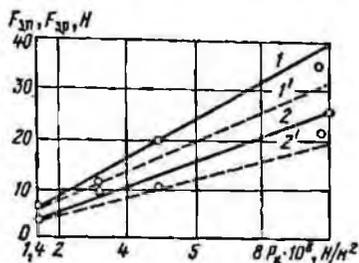


Рис. 38. Зависимости усилия резания алмазным зерном от контактной прочности  $P_k$  горных пород:

1, 2 — соответственно нормальная и касательная составляющие усилия резания (экспериментальные); 1' и 2' — то же (расчетные)

Для определения коэффициента трения алмаза о породу регистрировались силы трения  $F_{з.тр}$  и давления  $F'_{з.п}$  при обратном ходе динамометра, а коэффициент трения определялся как отношение  $f = \frac{F_{з.тр}}{F'_{з.п}}$ . Коэффициент трения алмазного

зерна о породу не одинаков при разрушении горных пород и величина его колеблется в пределах от 0,29 до 0,38. С изменением глубины резания коэффициент трения практически остается постоянным. Наибольшее значение коэффициента трения соответствует аргиллиту и равно 0,38, в наименьшее — углю 0,29; для песчаника и мрамора  $f_{тр}$  соответственно равен 0,35 и 0,33. Можно предположить, что коэффициент трения для более вязких горных пород имеет большую величину.

Влияние контактной прочности горных пород (рис. 38) на усилия резания и подачи характеризуется линейной зависимостью этих показателей при экспериментальных и аналитических исследованиях.

Результаты экспериментов подтвердили циклическую последовательность отделения с предварительным образованием уплотненного ядра и последующим отделением крупного элемента стружки, установили линейную зависимость силы резания и подачи от заглабления зерна и контактной прочности горных пород. Найдены соотношения между силой подачи и резания, коэффициент трения алмаза о породу. Доказана право-

мерность использования формул (49) и (50) при выводе выражений для расчета силовых и энергетических показателей разрушения.

### § 3. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Факторами, определяющими конструкцию и геометрию мелкоалмазного инструмента, являются его назначение и связанные с ним особенности работы. Так, ширина торца буровой коронки устанавливается возможно меньшей и ограничивается прочностью корпуса и зернистостью алмазов.

Выбор рациональной зернистости алмазов и их концентрации в связке осуществлялся в диапазоне наибольших значений производительности при двух значениях осевого усилия на инструмент (рис. 39). Частота вращения инструмента была постоянной и равнялась 210 рад/с. Как для усилия подачи 3500 Н, так и для усилия 6000 Н в диапазоне изменения зернистостей от А630/500 до А1250/1000 большая производительность соответствует концентрации 12,5% и только при зернистости алмазов крупнее А1250/1000 производительность разрушения большая при концентрации 25%.

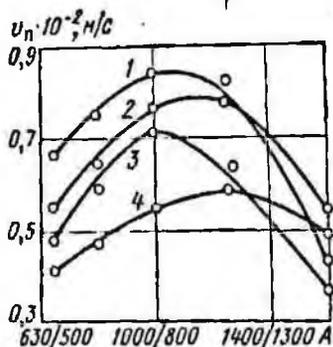


Рис. 39. Зависимости производительности бурения от зернистости алмазов А при усилиях подачи 6000 Н (1, 2) и 3500 Н (3, 4) при объемной концентрации алмазов в связке соответственно 12,5 и 25%

Такая закономерность объясняется особенностями геометрии рабочей поверхности алмазного инструмента. Действительно, при постоянной концентрации с увеличением зернистости число алмазных зерен на рабочей поверхности уменьшается обратно пропорционально среднему размеру алмазного зерна в третьей степени. В результате число этих зерен уменьшается настолько, что разрушающая способность рабочей поверхности оказывается недостаточной и чешуйки породы между резами не разрушаются. Это вызывает снижение производительности бурения или значительно увеличивает износ инструмента.

Если уменьшить зернистости при постоянной концентрации, то число зерен на рабочей поверхности увеличивается, объем, заполняемый продуктами разрушения, снижается, уменьшается также толщина стружки, снимаемой каждым отдельным зерном. Поэтому, чтобы обеспечить нормальные условия разрушения забоя, распределение продуктов разрушения в зоне контакта инструмента с породой и выноса продуктов разрушения из

этой зоны, необходимо снижать скорости подачи. Эта особенность геометрии рабочей поверхности импрегнированного алмазного инструмента и процессов разрушения отражена на рис. 39. Кривые 1, 3 и 2, 4, которым соответствует концентрация 12,5 и 25%, имеют максимум при определенной зернистости алмазов. Так, для концентрации 12,5% рациональная зернистость, при которой получена максимальная производительность, равна А1000/800, а для концентрации 25% — А1250/1000. Сила подачи не оказывает влияния на рациональное соотношение концентрации и зернистости. При концентрации, меньшей 12,5%, при всех исследованных значениях зернистости не была получена большая производительность, а при концентрации, большей 25%, требовалось применение крупных алмазов, что для импрегнированного инструмента экономически не оправдано.

Для резания горных пород дисками, армированными импрегнированными алмазными сегментами, целесообразно применять максимальную зернистость. Однако имеется ряд ограничений, связанных с технологией изготовления сегментов, которые необходимо учитывать при выборе зернистости. Установлено [7, 35], что ширина рабочей поверхности мелкоалмазного инструмента должна быть по крайней мере в 4 раза больше диаметра зерна. В противном случае алмазные зерна будут недостаточно прочно удерживаться связкой. Кроме того, ухудшаются условия для равномерного распределения зерен в объеме сегмента. Необходимо учитывать и то обстоятельство, что при постоянной концентрации алмазов с увеличением зернистости уменьшается число зерен на рабочей поверхности сегмента. Это снижает режущую способность инструмента, его работоспособность.

Если для буровых коронок в настоящее время применяются алмазы зернистостью А1000/800 и более, то для дисковых и штрипсовых инструментов целесообразнее использовать более мелкие и дешевые алмазы. Учитывая, что более крупные алмазы обеспечивают большую производительность для дискового и штрипсового инструмента, применяют две фракции зерен, выпускаемых промышленностью, — А630/500 и А800/630. Исследованиями, описанными в предыдущем параграфе, установлено, что размер алмазного зерна влияет на величину силы резания и подачи, что согласуется с аналитической зависимостью для единичного зерна. Но аналитические зависимости силловых и энергетических показателей разрушения пород для дисков, буровых коронок и штрипсовых пил показали отсутствие влияния зернистости алмазов на эти показатели. Это объясняется тем, что при выводе формул исходили из допущения полного поражения забоя зернами, участвующими в резании. Кроме того, из формул (16), (18) и (26) видно, что с увеличением размера зерна число зерен, участвующих в резании, уменьшается в квадратичной зависимости, а сила резания возрастает в квадратичной зависимости. Но так как для инструмента сум-

марные силы резания и подачи (первое слагаемое формул) определяются произведением  $n_{дф}$  на  $F_{зр}$ , то размер зерна на величину суммарных усилий практически не влияет.

Концентрация алмазов также существенно не влияет на силовые и энергетические показатели разрушения, а незначительное их изменение, обусловленное геометрией зерна, можно при расчетах не учитывать, так как при увеличении  $K_0$  с 6,25 до 25% изменение силы подачи и мощности разрушения не превышает 2%. Очевидно, что концентрация будет влиять на площадь контакта поверхности связки с забоем и продуктами разрушения, но даже при концентрации 25% площадь, занимаемая алмазными зернами, не превышает 7%, а учитывая то, что часть зерен не участвует в резании, но контактирует с забоем и продуктами разрушения, эта площадь еще уменьшается. Поэтому в аналитических формулах для силы подачи и мощности разрушения этим влиянием можно пренебречь. Общее требование к величине концентрации алмазов следующее: она должна быть минимальна, но достаточна для разрушения забоя при максимальной производительности и наименьшем износе инструмента. Достаточная минимальная концентрация (по массе), при которой алмазные зерна обеспечат полное поражение забоя, определяется из выражения [16]

$$K_{\min} = 0,6 \cdot 10^3 r^{3/2} \beta^{3/2}, \text{ кг/м}^3, \quad (99)$$

где  $\beta$  — коэффициент, характеризующий среднюю высоту выступающих из связки алмазных зерен. При разрушении пород контактной прочностью до 1200 МН/м<sup>2</sup>  $\beta=0,5$  для дискового инструмента и буровых коронок и  $\beta=0,35$  для штрипсового инструмента. При разрушении пород контактной прочностью более 1200 МН/м<sup>2</sup>  $\beta=0,35$  для дискового инструмента и буровых коронок и  $\beta=0,2$  для штрипсового инструмента.

Расчеты по этой формуле показывают, что при разрушении пород средней крепости дисковым инструментом минимально достаточная концентрация по массе равна  $0,125 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствует 3,2% объемной, а при разрушении крепких пород таким же инструментом  $K_{\min}=0,216 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, соответствует 6,2% объемной концентрации. Эти данные получены для зернистости А630/500; при зернистости А800/630  $K_{\min}$  увеличивается в 1,5 раза. Формулу для  $K_{\min}$  логично использовать как нижний ограничивающий предел для концентрации. Наибольшая производительность была получена при  $K=3K_{\min}$ . Но окончательный выбор концентрации должен производиться с учетом износа инструмента и экономических критериев.

Ширина сегмента должна соответствовать диску определенного диаметра. Связь между диаметром и шириной диска определяется исходя из требований к его прочности. Установлено [8], что прочность корпуса диска будет достаточная, если отношение толщины к диаметру не менее 1/126.

Алмазный инструмент исполнительных органов породопроходческих комбайнов целесообразно использовать для прорезания узких щелей в массиве породы. Междущелевые целики эффективно отделяются от массива с помощью специальных устройств. Возможна также конструкция исполнительного органа, которая работает на принципе вырезания блоков из массива. При работе исполнительных органов комбайнов по таким схемам важное значение имеет размер отделенных от массива кусков породы, так как они должны быть транспортабельны в условиях подземной добычи полезных ископаемых. Для современных транспортных машин и механизмов угольных шахт рекомендуется, чтобы наибольший размер кусков разрушенной породы не превышал 250 мм. Размер кусков породы при разрушении массива отрывом или вырезанием блоков с помощью алмазных дисков в значительной мере определяется диаметром диска. Исходя из конструктивных особенностей диаметр ступицы отрывника и крепежных фланцев составит 250—300 мм. Тогда диск диаметром 800 мм обеспечит прорезание щели в массиве глубиной 250 мм, при которой кусковатость разрушенной породы удовлетворяет предъявляемым выше требованиям.

Толщина штрипсовой пилы должна быть как можно меньшей, но ее жесткость достаточной для обеспечения направления резания и предотвращения искривления корпуса пилы. Размеры пилы устанавливаются специальным расчетом и регламентируются техническими условиями на серийное производство ТУ 2-037-102-73 «Штрипсы алмазные». Размеры брусков изменяются в узких пределах, и расстояние между брусками оказывает значительное влияние на второе слагаемое формул (97) и (98). С увеличением  $l_{\text{п}}$  второе слагаемое формул мощности резания и силы подачи уменьшается по закону дробно-линейной функции, при этом, если  $l_{\text{х}} = \text{const}$ , резко уменьшается разрушающая способность рабочей поверхности. Выбор  $l_{\text{п}}$  должен осуществляться с учетом износа инструмента [12].

Аналитическими исследованиями установлено, что с увеличением ширины алмазного диска мощность, расходуемая на разрушение, и усилие подачи возрастают линейно. С целью проверки этих исследований на полноразмерном стенде осуществлялось резание песчаника контактной прочностью 900 МН/м<sup>2</sup> алмазными дисками с постоянной характеристикой диаметром 800 мм. Для изменения ширины на ступицу планшайбы устанавливался сначала один диск, затем второй и третий. Опыт показал, что с увеличением ширины диска в 3 раза мощность возрастает для  $v_{\text{п}} = 0,011$  м/с в 2,4 раза, для  $v_{\text{п}} = 0,014$  м/с в 2,7 раза и для  $v_{\text{п}} = 0,022$  м/с в 2,6 раза, т. е. интенсивность роста мощности для исследованного диапазона скоростей подачи примерно одинакова. Удельные энергозатраты разрушения в этих условиях снижаются в 1,4 раза.

Усилия подачи с изменением ширины диска изменялись с меньшей интенсивностью для различных скоростей подачи.

Разрушение песчаника двумя алмазными дисками со встро-  
шенным между ними скальвателем показало, что с увеличением  
ширины щели между дисками между щелями снижение удельных затрат  
энергии на разрушение происходит более интенсивно, чем воз-  
растание мощности резания, а при изменении ширины инстру-  
мента удельные затраты энергии на разрушение изменяются  
менее интенсивно, чем мощность резания (рис. 40). Следова-  
тельно, использование междисковых скальвающих устройств  
позволяет при незначительном увеличении мощности существен-  
но снизить удельные энергозатраты на разрушение при одина-  
ковых режимах резания.

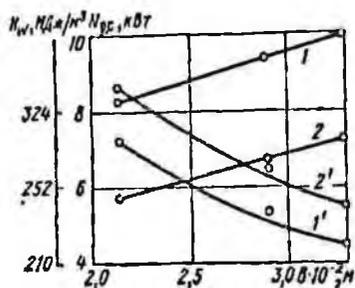


Рис. 40. Зависимости мощности резания  $N_p$  (1, 2) и удельных затрат энергии  $H_w$  (1', 2') на разрушение песчаника алмазным комбинированным диском от его ширины  $B$ :  
1, 1' и 2, 2' — соответственно для скорости подачи  $0,011 \cdot 10^{-2}$  и  $1,40 \cdot 10^{-2}$  м/с (скорость резания 52 м/с, глубина резания 1,1 м)

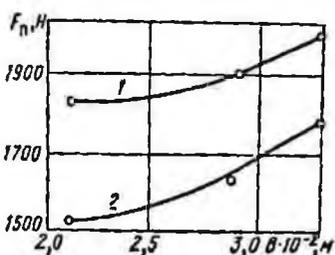


Рис. 41. Зависимости усилия подачи  $F_n$  от ширины комбинированного инструмента  $B$  при разрушении песчаника:

1, 2 — соответственно для скоростей подачи 0,011 и 0,014 м/с (скорость резания 52 м/с, глубина резания 0,1 м)

Анализ зависимости усилия подачи  $F_n$  от ширины комбинированного инструмента позволил установить его изменение в 1,18 раза для  $v_n=0,011$  м/с и в 1,10 раз для  $v_n=0,014$  м/с в том же диапазоне ширины инструмента; характер изменения усилия подачи с увеличением ширины щели идентичен характеру изменения мощности резания (рис. 41). Таким образом, подтверждена линейная зависимость силовых и энергетических показателей от ширины рабочей поверхности инструмента. Выявлено определенное отклонение от прямо пропорционального изменения этих величин, которое должно быть учтено в расчетных формулах. Так, в формулы для мощности необходимо ввести коэффициент влияния ширины инструмента  $K_{ш}=0,85$ , а в формулу для расчета силы подачи —  $K'_{ш}=1,2$ .

Так как значение коэффициентов  $K_{ш}$  и  $K'_{ш}$  обусловлено процессами, происходящими в зоне разрушения, и свойственно мелкоалмазной импрегнированной рабочей поверхности, то эти

коэффициенты без риска внести существенную погрешность можно использовать в формулах не только дискового, но и других типов инструмента. Однако для диска и штрипсовой пилы толщиной 7 мм и меньше, буровой коронки типа 1АГК диаметром 46 мм при толщине рабочего кольца 7 мм и меньше значение этих коэффициентов равно единице.

#### § 4. РЕЖИМЫ РАЗРУШЕНИЯ

Режимы разрушения горных пород алмазным инструментом характеризуются параметрами, от которых зависят эксплуатационные показатели его работы [6, 32]. Такими параметрами являются скорости подачи и резания, свойственные любому алмазному породоразрушающему инструменту независимо от его назначения и формы.

Бурение карагинских песчаников контактной прочностью 1000—1500 МН/м<sup>2</sup> и абразивностью  $0,20 \cdot 10^{-2}$ — $0,28 \cdot 10^{-4}$  кг алмазными коронками типа 1АГК с различной зернистостью и концентрацией алмазов позволило установить влияние частоты вращения коронки на скорость бурения, потребляемую мощность на удельные затраты энергии на разрушение при различных осевых усилиях подачи. Бурение осуществлялось на стенде и в шахтных условиях коронками диаметром 46 мм с объемной концентрацией 12,5 и 25%, зернистостью А1000/800 и А1250/1000, с изменением скорости резания, усилия резания и усилия подачи. Как видно из рис. 42, при увеличении частоты вращения коронки скорость бурения увеличивается неравномерно. Если при увеличении частоты вращения от 126 до 210 рад/с скорость бурения растет с  $0,18 \cdot 10^{-2}$  до  $0,50 \cdot 10^{-2}$  м/с, т. е. почти в 3 раза, то при увеличении частоты вращения от 210 до 294 рад/с этот рост составляет от  $0,50 \cdot 10^{-2}$  до  $0,63 \cdot 10^{-2}$  м/с. Начиная с 273 рад/с, при усилнии подачи в 3000 Н дальнейшее увеличение частоты вращения коронки практически

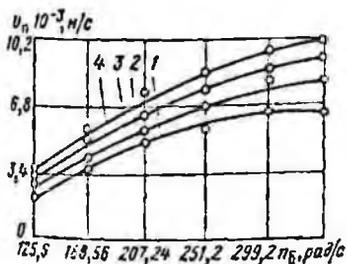


Рис. 42. Зависимости (1—4) производительности бурения от частоты вращения коронки 1АГК (А1250/1000, К25%) при усилиях подачи соответственно 3000, 4500, 6000 и 8000 Н

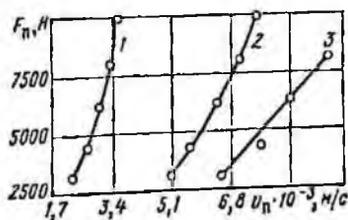


Рис. 43. Зависимости (1—3) силы подачи от скорости бурения коронкой 1АГК (А1250/1000, К25%) при частоте вращения соответственно 126, 210, 294 рад/с

не приводит к росту скорости бурения во всем исследованном диапазоне изменения сил подачи.

Рост производительности при увеличении скорости резания объясняется более интенсивным воздействием работающих алмазных зерен на поверхность забоя при удовлетворительном удалении продуктов разрушения из зоны контакта инструмента с породой. Но рост производительности с увеличением скорости резания постепенно замедляется из-за стабилизации и недостаточного внедрения алмазных зерен в массив.

Рост производительности при постоянной частоте вращения коронки обеспечивается увеличением силы подачи (рис. 43). При 126 рад/с увеличению производительности от  $0,20 \cdot 10^{-2}$  до  $0,35 \cdot 10^{-2}$  м/с соответствует увеличение силы подачи с 3000 до

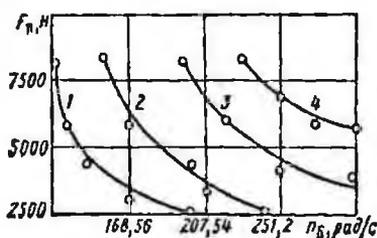


Рис. 44. Зависимости (1—4) силы подачи от частоты вращения коронки 1АГК (А1250/1000, К25%) при скорости бурения соответственно  $3,4 \times 10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $6,8 \cdot 10^{-3}$ ,  $8,3 \cdot 10^{-3}$  м/с

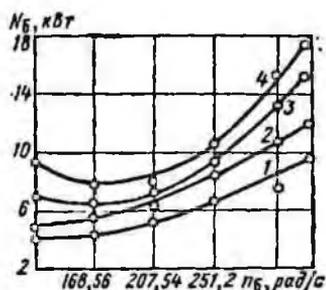


Рис. 45. Зависимости (1—4) мощности бурения от угловой частоты вращения коронки 1АГК (А1250/1000, К25%) при усилиях подачи соответственно 3000, 4500, 6000 и 8000 Н

10 000 Н, т. е. интенсивность увеличения силы подачи почти в 1,6 раза больше, чем при 294 рад/с. Увеличение частоты вращения не только повышает производительность бурения, но и обеспечивает меньшее влияние скорости бурения на силу подачи (рис. 44). В зоне сравнительно малой частоты вращения коронки (кривая 1) сила подачи изменяется резко, что неблагоприятно сказывается на работе привода исполнительного органа бурильной машины. При большой частоте вращения коронки этот параметр в меньшей мере влияет на силу подачи, что подтверждает целесообразность бурения горных пород средней крепости типа песчаников мелкоалмазными импрегнированными коронками при более высоких числах оборотов.

Частота вращения коронки и скорость бурения определяют энергетические показатели разрушения, которые являются исходными для прочностных расчетов и выбора мощности привода бурового оборудования.

Замедление роста мощности и даже ее снижение с увеличением частоты вращения коронки в некотором диапазоне (рис. 45) объясняется условиями выноса продуктов разрушения. Сила трения рабочей поверхности и боковых поверхностей коронки на 70—80% образуется за счет трения о продукты разрушения, от этой силы во многом зависит мощность, необходимая на вращение коронки. Увеличение частоты вращения коронки при прочих равных условиях способствует более быстрому выносу продуктов разрушения из зоны резания и тем самым улучшает условия работы алмазных зерен, уменьшение объема продуктов разрушения приводит к снижению сил трения. Это снижение сил трения в определенном диапазоне изменения частоты вращения коронки имеет преобладающее

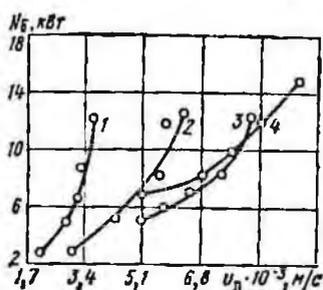


Рис. 46. Зависимости (1—4) мощности бурения от скорости бурения коронкой 1АГК (А1250/1000, К25%) при частоте ее вращения соответственно 126, 168, 210 и 294 рад/с

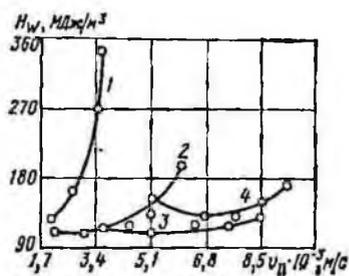


Рис. 47. Зависимости (1—4) удельных затрат энергии на разрушение от скорости бурения коронкой 1АГК (А1250/1000, К25%) при угловой частоте ее вращения соответственно 126, 168, 210 и 294 рад/с

значение в формировании мощности на разрушение. Поэтому с изменением частоты вращения от 126 до 210 рад/с при осевой силе 8000 Н мощность на разрушение несколько снижается. С дальнейшим ростом частоты вращения положительное влияние скорости резания, облегчающее вынос продуктов разрушения, оказывается недостаточным и мощность возрастает. Более быстрый рост мощности наблюдается при бурении с большими силами подачи. Это обусловлено большим заглублением в массив алмазных зерен и уменьшением зазора между неразрушенной породой и поверхностью матрицы коронки, что ухудшает условия распределения продуктов разрушения в зоне контакта инструмента с породой.

При постоянной частоте вращения коронки увеличение скорости бурения сопровождается ростом мощности на разрушение забоя (рис. 46). Чем выше частота вращения коронки, тем медленнее происходит изменение мощности, необходимой на

разрушение. Такая же закономерность ранее отмечена при анализе влияния производительности бурения на силу подачи (см. рис. 43). Это свидетельствует о сходном качественном влиянии режимов разрушения на силы резания и подачи. Расчеты показывают, что отношение силы подачи к силе резания в исследованном диапазоне изменяются в пределах 2,5—3,6; большее значение отношения соответствует частоте вращения 294 рад/с. На величину отношения силы подачи к силе резания оказывают влияние процесс отделения породы от забоя алмазными зернами и взаимодействие поверхности матрицы и корпуса коронки с поверхностью забоя и продуктами разрушения. Большая интенсивность роста мощности с увеличением скорости подачи при меньшей частоте вращения коронки обусловлена в основном действием второго фактора.

Наиболее представительным показателем, с помощью которого можно учесть влияние режимов разрушения, являются удельные затраты энергии на разрушение (рис. 47). Каждому минимуму удельных затрат на разрушение соответствует определенное соотношение скорости подачи коронки и скорости резания. Так, для кривой 4 рациональное отношение  $v_n/v_p = 1,11 \cdot 10^{-3}$ , для кривой 3 —  $1,01 \cdot 10^{-3}$ , для кривой 2 —  $0,83 \cdot 10^{-3}$  и для кривой 1 —  $0,67 \cdot 10^{-3}$ . Рациональное соотношение скоростей подачи и резания коронки изменяется в достаточно широких пределах, и чем выше скорость резания, тем соотношение больше. Это подтверждает вывод о существенном влиянии скорости резания на удаление продуктов разрушения из зоны контакта инструмента с породой; большая скорость резания улучшает удаление продуктов разрушения и позволяет увеличить скорость подачи, тогда как при меньшей частоте вращения коронки продукты разрушения удаляются хуже, поэтому относительная скорость подачи меньше.

Экспериментальные исследования влияния режимов разрушения на силовые и энергетические показатели при резании горных пород алмазным диском проводились на специальном полноразмерном стенде, который позволял плавно регулировать скорость подачи в широком диапазоне, а в качестве привода вращения алмазного диска применять как асинхронный электродвигатель серии КО мощностью 32 кВт и частотой вращения 157,5 рад/с, так и гидродвигатель типа ИМ-20 с устойчивым плавным регулированием частоты вращения от 15,8 до 168 рад/с, позволяющим получать мощность на инструменте до 50 кВт. Резанию в основном подвергались граниты, мраморы, песчаники и аргиллиты контактной прочностью от 500 до 1600 МН/м<sup>2</sup> и абразивностью от  $0,05 \cdot 10^{-4}$  до  $0,40 \cdot 10^{-4}$  кг, а также угли. В качестве инструмента использовался алмазный диск типа АОК-800 зернистостью А800/630—А630/500 и объемной концентрацией 12,5%.

Полученные зависимости мощности от глубины резания

для различных скоростей подачи и от скорости подачи для различных глубин резания показывают, что при изменении глубины резания от 30 до 240 мм мощность изменяется линейно для скоростей подачи от  $0,6 \cdot 10^{-2}$  до  $2,37 \cdot 10^{-2}$  м/с, а для скоростей подачи  $3,33 \cdot 10^{-2}$ ;  $4,17 \cdot 10^{-2}$ ;  $5,17 \cdot 10^{-2}$  и  $6,0 \cdot 10^{-2}$  м/с линейная зависимость сохраняется только до определенного значения глубины резания; дальнейшее увеличение глубины резания вызывает рост мощности по степенной зависимости с показателем степени больше единицы.

Изучение зависимости мощности резания от скорости подачи для различных глубин резания показало, что для глубины резания 100 мм мощность возрастает практически линейно до скорости подачи  $5,17 \cdot 10^{-2}$  м/с; при глубине резания 150 мм мощность примерно линейно возрастает с увеличением скорости подачи до  $3,33 \cdot 10^{-2}$  м/с и т. д., т. е. дальнейшее увеличение скорости подачи сопровождается значительным ростом мощности.

Таким образом, можно утверждать, что существуют некоторые значения скорости резания и подачи при прочих равных условиях, до которых мощность, расходуемая на резание, изменяется примерно линейно и дальнейшее увеличение одного или другого либо одновременно двух этих параметров вызывает резкое возрастание мощности.

В отношении зависимости удельных затрат энергии на разрушение от глубины резания при различных скоростях подачи и зависимости удельных затрат энергии от скорости подачи для различных глубин резания было установлено, что для определенных значений глубины резания и скорости подачи алмазного диска существует минимальная величина удельных затрат энергии разрушения.

Влияние скорости резания на потребляемую мощность и усилие подачи изучалось при постоянстве отношений между скоростями подачи и резания, т. е. при постоянной толщине стружки, что исключало влияние этого параметра на исследуемые величины. Для каждого из принятых глубин резания (100, 150, 200 и 250 мм) устанавливались зависимости энергетических и силовых показателей от скорости резания для различных соотношений скоростей подачи и резания.

На рис. 48 представлены кривые изменения мощности резания песчаника в зависимости от скорости резания, которая изменялась от 12 до 52 м/с, при этом глубина резания была постоянной. В пределах одной кривой отношение  $v_n/v_p$  не изменяется, чем достигается постоянство толщины срезаемой стружки, так что увеличение мощности разрушения вызвано только ростом скорости резания. Как видно, увеличение мощности резания происходит быстрее, чем изменения скорости резания. Снижение интенсивности роста мощности резания с увеличением величины стружки свидетельствуют о том, что при большой толщине стружки, приходящейся на каждое алмазное

зерно, более эффективно происходит удаление продуктов разрушения и меньшая их доля подвергается повторному переизмельчению. Это справедливо только для тех режимов резания, при которых объем продуктов разрушения не препятствует отделению стружки алмазными зернами.

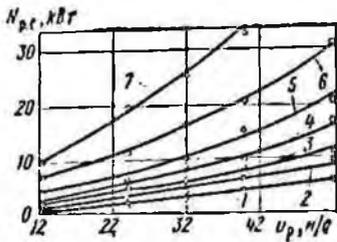


Рис. 48. Зависимости (1—7) мощности резания  $N_{pe}$  от скорости резания  $v_p$  при отношении  $v_n/v_p \cdot 10^{-4}$  соответственно 2,1; 2,8; 4,2; 5,6; 7,0; 10,5 и 14,0 (глубина резания 0,25 м)

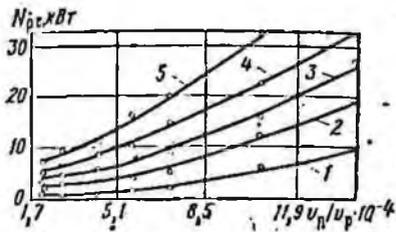


Рис. 49. Зависимости (1—5) мощности резания  $N_{pe}$  от отношения  $v_n/v_p$  соответственно для скоростей резания 12, 24, 32, 40, 52 м/с (глубина резания 0,25 м)

Мощность резания зависит от отношения  $v_n/v_p$ , что видно из рис. 49. Поскольку величина  $v_n/v_p$  прямо пропорциональна толщине стружки, срезаемой алмазными зернами, эти зависимости можно одновременно рассматривать и в координатах мощность — толщина срезаемого слоя.

Анализ рис. 49 показывает, что изменение мощности в зависимости от отношения  $v_n/v_p$  при равных скоростях резания происходит с различной интенсивностью, причем при более высоких скоростях резания интенсивность роста потребляемой мощности меньше, чем при низких скоростях резания. С увеличением скорости резания более 32 м/с интенсивность изменения мощности практически остается постоянной. Поскольку в установленном режиме работы инструмента мощность на вынос продуктов разрушения составляет не более 3—4% от мощности, затрачиваемой на преодоление сил трения, то ее не следует выделять как самостоятельную составляющую суммарной мощности разрушения. Тогда при одной и той же скорости подачи для большей скорости резания суммарная мощность разрушения будет больше на величину приращения мощности трения. Этот вывод подтверждается рис. 50, на котором приведены зависимости мощности разрушения песчаника от скорости подачи алмазного диска для различных скоростей резания при постоянной глубине резания.

Из рис. 50 видно, что сделанный вывод справедлив до тех пор, пока не происходит нарушение нормального режима резания, т. е. пока продукты разрушения не затрудняют отделения стружки алмазными зернами. Однако по мере роста скорости подачи объем продуктов разрушения и их давление, а следо-

вательно усилие трения, возрастают, что приводит к росту удельных затрат энергии. Нарушение нормальных режимов работы происходит раньше для меньшей скорости резания, вследствие чего начинается интенсивный рост потребляемой мощности. Отсюда видно, что увеличением скорости резания можно добиться снижения потребляемой мощности в том случае, если разрушение на меньшей скорости резания происходило не в рациональном режиме.

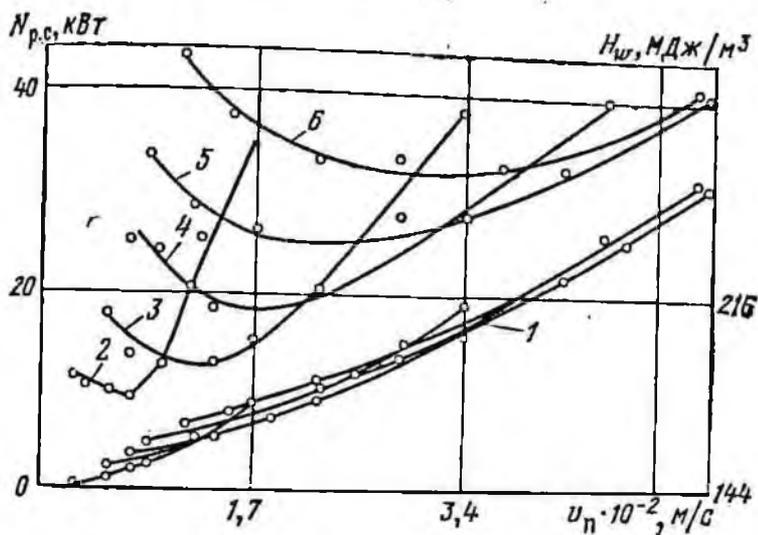


Рис. 50. Зависимости (1—6) мощности (кривые 1) и удельных затрат энергии (кривые 2—6) на разрушение песчаника от скорости подачи. Кривым 1—6 соответствуют скорости резания 12, 24, 32, 40, 52 м/с (глубина резания 0,25 м)

Если принимать во внимание только удельные затраты энергии, то целесообразно осуществлять разрушение на малых скоростях резания. Но малые скорости резания не позволяют работать в широком диапазоне скоростей подачи, так как сравнительно небольшое увеличение скорости подачи вызывает быстрый рост удельных энергозатрат. Увеличение скорости подачи от  $0,83 \cdot 10^{-2}$  до  $1,67 \cdot 10^{-2}$  м/с при скорости резания 12 м/с вызывает рост  $H_w$  с 180 до 270 МДж/м<sup>3</sup>, тогда как при скорости резания 52 м/с изменение скорости подачи от  $2,5 \cdot 10^{-2}$  до  $5,3 \cdot 10^{-2}$  м/с вызывает рост  $H_w$  с 259 до 295 МДж/м<sup>3</sup>. Кроме того, рост  $v_p$  с 12 по 40 м/с позволяет при рациональных режимах увеличить производительность резания от  $0,21 \cdot 10^{-2}$  до  $0,6 \cdot 10^{-2}$  м/с. При этом мощность резания возрастает с 2,5 до 10 кВт, а удельные энергозатраты увеличиваются только на 30%. Это доказывает, что при резании пород алмазным диском целесообразно применять высокие скорости резания. Аналогичные зависимости потребляемой при разрушении мощности и удельных энергозатрат от скоростей резания и подачи, а также

от соотношения между ними имеют место при разрушении песчаника на глубинах резания, равных 100, 150 и 200 мм. Для алмазного диска мощность резания пропорциональна длине дуги его контакта с разрушаемым массивом.

Получены следующие результаты расчета длины дуги контакта алмазного диска с породой в зависимости от глубины резания для диска радиусом  $R=400$  мм:

Глубина резания $H$ , мм . . . . .	50	100	150	200	250	300	400	800
Центральный угол $\varphi$ , рад . . . . .	0,50	0,72	0,90	1,05	1,19	1,32	1,57	3,14
Длина дуги контакта $l_k$ , мм . . . . .	200	288	360	420	476	528	628	1256

Из приведенного выше видно, что глубина резания растет быстрее длины дуги контакта диска с породой. Отставание в росте длины контакта от глубины резания приводит к тому, что потребляемая мощность, пропорциональна  $R\varphi$ , также возрастает медленнее глубины резания. Например, увеличение глубины резания в 2,5 раза (от 100 до 250 мм) при отношении  $v_n/v_p = 1,04 \cdot 10^{-3}$  вызывает рост мощности резания в 1,77 раза (от 13 до 23 кВт).

Отставание роста потребляемой мощности от глубины резания является одной из причин того, что с увеличением глубины резания удельные затраты энергии разрушения уменьшаются.

При одной и той же установленной мощности привода в некоторых случаях увеличения производительности, т. е. максимально возможной скорости подачи, можно достигнуть за счет повышения скорости резания. Иными словами, между скоростями подачи и резания не только обнаружена пропорциональная зависимость, что в общем-то характерно для режущего органа, но наблюдается также снижение потребляемой мощности при более высокой скорости подачи. Когда при определенной скорости резания скорость подачи имеет нерациональную величину, мощность, потребляемая алмазным диском, а также удельные затраты энергии разрушения возрастают. При этом небольшое увеличение скорости подачи приводит к значительному росту потребляемой мощности (см. рис. 50). Алмазный диск начинает работать в режиме с большим расходом энергии на преодоление сил трения. Увеличение же скорости резания улучшает распределение и вынос продуктов разрушения из зоны резания, и мощность, необходимая для обеспечения той же производительности, снижается. Аналогичная особенность отмечается и при бурении.

С практической точки зрения представляет интерес определение наиболее выгодного соотношения между скоростями подачи и резания, при котором будет иметь место максимальная производительность в заданных условиях. Отношение скорости подачи и скорости резания, пропорциональное толщине стружки, срезаемой алмазными зернами, является, таким образом, важным технологическим параметром.

Наряду с мощностью, потребляемой при разрушении, усилие

выцесь ширину контакта заглубленной в породу части зерна  $b_k$ . Тогда для глубины резания 0,05 мм это отношение равно 3,6, а для глубины резания 0,1 мм — 3,5. Следовательно, с изменением глубины резания в 2 раза оптимальное отношение для обеих пород остается примерно одинаковым.

Зависимости силы резания от заглубления алмазного зерна в породу (глубины резания), полученные экспериментально, приведены на рис. 35, из которого видно, что с изменением глубины силы резания меняются линейно. Качественный характер

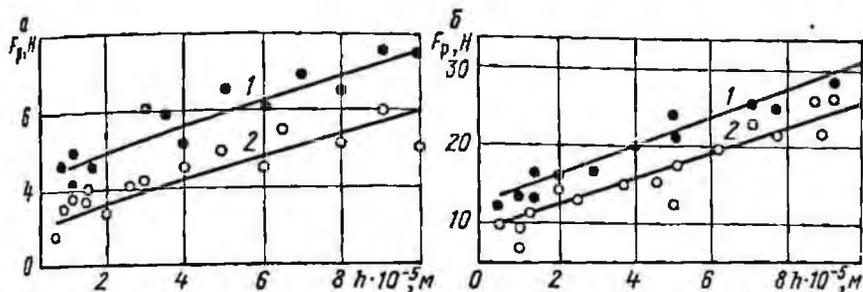


Рис. 35. Зависимости силы резания от глубины резания для: а — мрамора (1) и песчаника (2); б — кварцита (1) и гранита (2)

изменения силы резания мрамора, песчаника, гранита и кварцита примерно одинаков.

Отношение силы подачи к силе резания на протяжении опытов оставалось постоянным. Так, для песчаника, мрамора, гранита и кварцита при глубине резания 0,05 мм это отношение соответственно равно 1,4; 1,6; 1,8; 2,1. Величина  $F_{з.п}/F_{з.р}$  несколько возрастает при указанной последовательности расположения пород. Этот рост объясняется влиянием физико-механических свойств пород и для песчаника, имеющего меньше по сравнению с остальными тремя породами плотность и контактную прочность, величина  $F_{з.п}/F_{з.р}$  наименьшая, а для прочного и плотного шокшинского кварцита она наибольшая.

На рис. 36 показаны характерные осциллограммы усилий резания и подачи при разрушении образца песчаника алмазными зернами различной величины. Из осциллограмм видно, что как усилия резания, так и усилия подачи по мере перемещения зерна изменяются скачкообразно, причем независимо от величины зерна усилие подачи больше усилия резания в среднем в 1,5 раза. Величина обоих усилий по мере увеличения зернистости алмазов закономерно возрастает. На всем пути резания наблюдается соответствие в изменении усилий резания и подачи. Закономерность изменения усилий подтверждает ранее сделанный на основании анализа киноленты вывод о периодичности отделения крупных элементов стружки. Моменту отделения

крупных элементов соответствует на осциллограмме резкое снижение усилий, в некоторых случаях до нуля, чему предшествует скол мелких частиц породы, при котором большого снижения усилий не наблюдается. Средняя величина коэффициента динамичности разрушения составляет около 1,4.

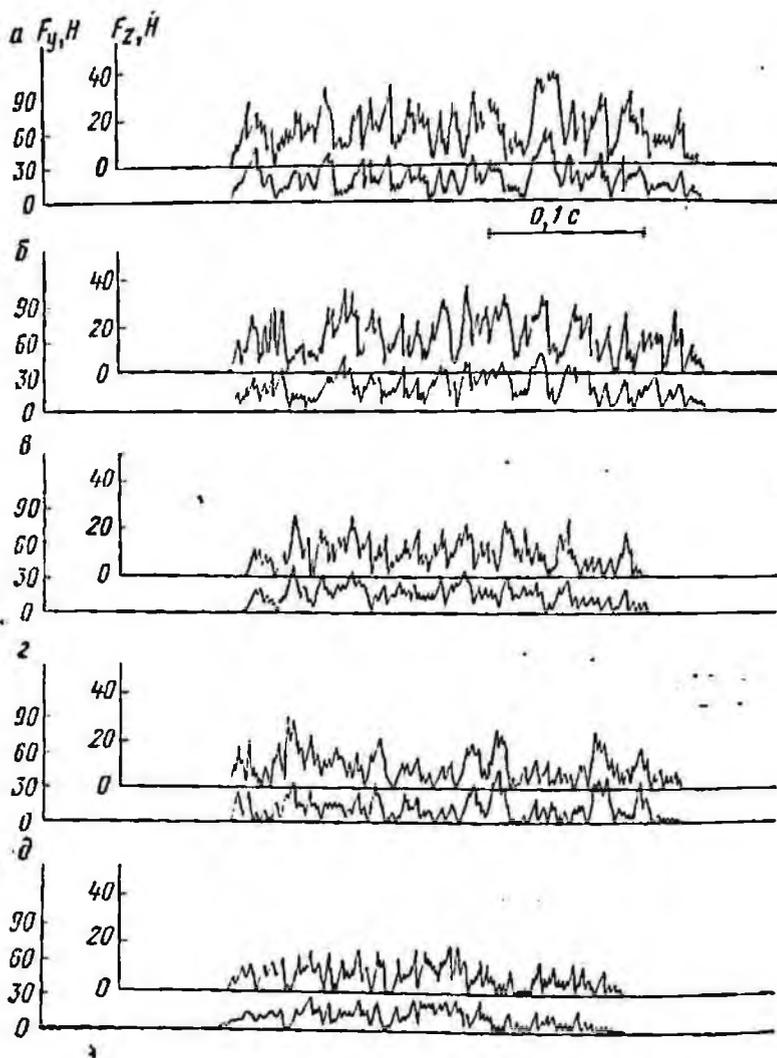


Рис. 36. Осциллограммы усилий (а—д) при резании песчаника единичными алмазными зернами диаметром соответственно 2,6; 2,06; 1,62; 0,86; 0,68 мм

По результатам замера усилий резания и подачи песчаника построены зависимости этих усилий от заглубления алмазного зерна (рис. 37). Как видно, экспериментальные и расчетные

значения усилий резания и подачи с ростом заглубления алмазного зерна возрастают по зависимости, близкой к линейной. Во всех случаях усилия подачи больше усилий резания; абсолютная разница между усилиями с ростом глубины возрастает, тогда как отношение  $F_{з.п}/F_{з.р}$  практически остается постоянным и в среднем составляет 1,5.

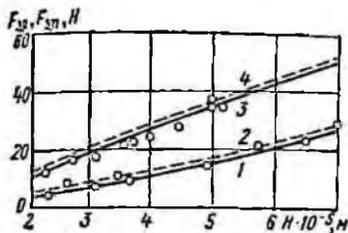


Рис. 37. Зависимости усилий соответственно резания (1, 2) и подачи (3, 4) от глубины резания алмазным зерном диаметром 2 мм (пунктирные линии построены по расчетным данным)

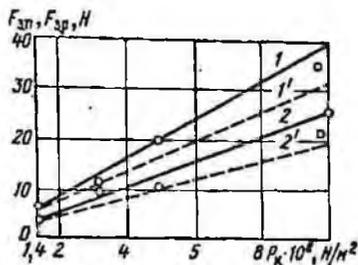


Рис. 38. Зависимости усилия резания алмазным зерном от контактной прочности  $P_k$  горных пород:

1, 2 — соответственно нормальная и касательная составляющие усилия резания (экспериментальные); 1' и 2' — то же (расчетные)

Для определения коэффициента трения алмаза о породу регистрировались силы трения  $F_{з.тр}$  и давления  $F'_{з.п}$  при обратном ходе дилатометра, а коэффициент трения определялся как отношение  $f = \frac{F_{з.тр}}{F'_{з.п}}$ . Коэффициент трения алмазного

зерна о породу не одинаков при разрушении горных пород и величина его колеблется в пределах от 0,29 до 0,38. С изменением глубины резания коэффициент трения практически остается постоянным. Наибольшее значение коэффициента трения соответствует аргиллиту и равно 0,38, в наименьшее — углю 0,29; для песчаника и мрамора  $f_{тр}$  соответственно равен 0,35 и 0,33. Можно предположить, что коэффициент трения для более вязких горных пород имеет большую величину.

Влияние контактной прочности горных пород (рис. 38) на усилия резания и подачи характеризуется линейной зависимостью этих показателей при экспериментальных и аналитических исследованиях.

Результаты экспериментов подтвердили циклическую последовательность отделения с предварительным образованием уплотненного ядра и последующим отделением крупного элемента стружки, установили линейную зависимость силы резания и подачи от заглубления зерна и контактной прочности горных пород. Найдены соотношения между силой подачи и резания, коэффициент трения алмаза о породу. Доказана право-

мерность использования формул (49) и (50) при выводе выражений для расчета силовых и энергетических показателей разрушения.

### § 3. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Факторами, определяющими конструкцию и геометрию мелкоалмазного инструмента, являются его назначение и связанные с ним особенности работы. Так, ширина торца буровой коронки устанавливается возможно меньшей и ограничивается прочностью корпуса и зернистостью алмазов.

Выбор рациональной зернистости алмазов и их концентрации в связке осуществлялся в диапазоне наибольших значений производительности при двух значениях осевого усилия на инструмент (рис. 39). Частота вращения инструмента была постоянной и равнялась 210 рад/с. Как для усилия подачи 3500 Н, так и для усилия 6000 Н в диапазоне изменения зернистостей

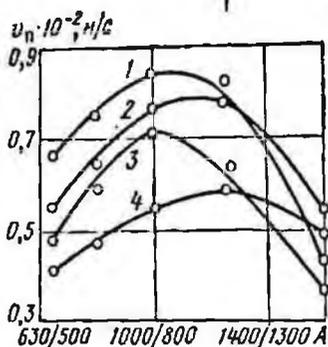


Рис. 39. Зависимости производительности бурения от зернистости алмазов А при усилиях подачи 6000 Н (1, 2) и 3500 Н (3, 4) при объемной концентрации алмазов в связке соответственно 12,5 и 25%

от А630/500 до А1250/1000 большая производительность соответствует концентрации 12,5% и только при зернистости алмазов крупнее А1250/1000 производительность разрушения большая при концентрации 25%. Такая закономерность объясняется особенностями геометрии рабочей поверхности алмазного инструмента. Действительно, при постоянной концентрации с увеличением зернистости число алмазных зерен на рабочей поверхности уменьшается обратно пропорционально среднему размеру алмазного зерна в третьей степени. В результате число этих зерен уменьшается настолько, что разрушающая способность рабочей поверхности оказывается недостаточной и целочки породы между резами не разрушаются. Это вызывает снижение производительности бурения или значительно увеличивает износ инструмента.

Если уменьшить зернистости при постоянной концентрации, то число зерен на рабочей поверхности увеличивается, объем, заполняемый продуктами разрушения, снижается, уменьшается также толщина стружки, снимаемой каждым отдельным зерном. Поэтому, чтобы обеспечить нормальные условия разрушения забоя, распределение продуктов разрушения в зоне контакта инструмента с породой и выноса продуктов разрушения из

этой зоны, необходимо снижать скорости подачи. Эта особенность геометрии рабочей поверхности импрегнированного алмазного инструмента и процессов разрушения отражена на рис. 39. Кривые 1, 3 и 2, 4, которым соответствует концентрация 12,5 и 25%, имеют максимум при определенной зернистости алмазов. Так, для концентрации 12,5% рациональная зернистость, при которой получена максимальная производительность, равна А1000/800, а для концентрации 25% — А1250/1000. Сила подачи не оказывает влияния на рациональное соотношение концентрации и зернистости. При концентрации, меньшей 12,5%, при всех исследованных значениях зернистости не была получена большая производительность, а при концентрации, большей 25%, требовалось применение крупных алмазов, что для импрегнированного инструмента экономически не оправдано.

Для резания горных пород дисками, армированными импрегнированными алмазными сегментами, целесообразно применять максимальную зернистость. Однако имеется ряд ограничений, связанных с технологией изготовления сегментов, которые необходимо учитывать при выборе зернистости. Установлено [7, 35], что ширина рабочей поверхности мелкоалмазного инструмента должна быть по крайней мере в 4 раза больше диаметра зерна. В противном случае алмазные зерна будут недостаточно прочно удерживаться связкой. Кроме того, ухудшаются условия для равномерного распределения зерен в объеме сегмента. Необходимо учитывать и то обстоятельство, что при постоянной концентрации алмазов с увеличением зернистости уменьшается число зерен на рабочей поверхности сегмента. Это снижает режущую способность инструмента, его работоспособность.

Если для буровых коронок в настоящее время применяются алмазы зернистостью А1000/800 и более, то для дисковых и штрипсовых инструментов целесообразнее использовать более мелкие и дешевые алмазы. Учитывая, что более крупные алмазы обеспечивают большую производительность для дискового и штрипсового инструмента, применяют две фракции зерен, выпускаемых промышленностью, — А630/500 и А800/630. Исследованиями, описанными в предыдущем параграфе, установлено, что размер алмазного зерна влияет на величину силы резания и подачи, что согласуется с аналитической зависимостью для единичного зерна. Но аналитические зависимости пород для дисков, энергетических показателей разрушения пород для дисков, буровых коронок и штрипсовых пил показали отсутствие влияния зернистости алмазов на эти показатели. Это объясняется тем, что при выводе формул исходили из допущения полного поражения забоя зернами, участвующими в резании. Кроме того, из формул (16), (18) и (26) видно, что с увеличением размера зерна число зерен, участвующих в резании, уменьшается в квадратичной зависимости, а сила резания возрастает в квадратичной зависимости. Но так как для инструмента сум-

марные силы резания и подачи (первое слагаемое формул) определяются произведением  $n_{\text{дф}}$  на  $F_{\text{др}}$ , то размер зерна на величину суммарных усилий практически не влияет.

Концентрация алмазов также существенно не влияет на силовые и энергетические показатели разрушения, а незначительное их изменение, обусловленное геометрией зерна, можно при расчетах не учитывать, так как при увеличении  $K_0$  с 6,25 до 25% изменение силы подачи и мощности разрушения не превышает 2%. Очевидно, что концентрация будет влиять на площадь контакта поверхности связки с забоем и продуктами разрушения, но даже при концентрации 25% площадь, занимаемая алмазными зернами, не превышает 7%, а учитывая то, что часть зерен не участвует в резании, но контактирует с забоем и продуктами разрушения, эта площадь еще уменьшается. Поэтому в аналитических формулах для силы подачи и мощности разрушения этим влиянием можно пренебречь. Общее требование к величине концентрации алмазов следующее: она должна быть минимальна, но достаточна для разрушения забоя при максимальной производительности и наименьшем износе инструмента. Достаточная минимальная концентрация (по массе), при которой алмазные зерна обеспечат полное поражение забоя, определяется из выражения [16]

$$K_{\text{min}} = 0,6 \cdot 10^3 \gamma^{3/2} \beta^{3/2}, \text{ кг/м}^3, \quad (99)$$

где  $\beta$  — коэффициент, характеризующий среднюю высоту выступающих из связки алмазных зерен. При разрушении пород контактной прочностью до 1200 МН/м<sup>2</sup>  $\beta=0,5$  для дискового инструмента и буровых коронок и  $\beta=0,35$  для штрипсового инструмента. При разрушении пород контактной прочностью более 1200 МН/м<sup>2</sup>  $\beta=0,35$  для дискового инструмента и буровых коронок и  $\beta=0,2$  для штрипсового инструмента.

Расчеты по этой формуле показывают, что при разрушении пород средней крепости дисковым инструментом минимально достаточная концентрация по массе равна  $0,125 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствует 3,2% объемной, а при разрушении крепких пород таким же инструментом  $K_{\text{min}}=0,216 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, соответствует 6,2% объемной концентрации. Эти данные получены для зернистости А630/500; при зернистости А800/630  $K_{\text{min}}$  увеличивается в 1,5 раза. Формулу для  $K_{\text{min}}$  логично использовать как нижний ограничивающий предел для концентрации. Наибольшая производительность была получена при  $K=3K_{\text{min}}$ . Но окончательный выбор концентрации должен производиться с учетом износа инструмента и экономических критериев.

Ширина сегмента должна соответствовать диску определенного диаметра. Связь между диаметром и шириной диска определяется исходя из требований к его прочности. Установлено [8], что прочность корпуса диска будет достаточная, если отношение толщины к диаметру не менее 1/126.

Алмазный инструмент исполнительных органов породопроходческих комбайнов целесообразно использовать для прорезания узких щелей в массиве породы. Междущелевые целики эффективно отделяются от массива с помощью специальных устройств. Возможна также конструкция исполнительного органа, которая работает на принципе вырезания блоков из массива. При работе исполнительных органов комбайнов по таким схемам важное значение имеет размер отделенных от массива кусков породы, так как они должны быть транспортабельны в условиях подземной добычи полезных ископаемых. Для современных транспортных машин и механизмов угольных шахт рекомендуется, чтобы наибольший размер кусков разрушенной породы не превышал 250 мм. Размер кусков породы при разрушении массива отрывом или вырезанием блоков с помощью алмазных дисков в значительной мере определяется диаметром диска. Исходя из конструктивных особенностей диаметр ступицы отрывника и крепежных фланцев составит 250—300 мм. Тогда диск диаметром 800 мм обеспечит прорезание щели в массиве глубиной 250 мм, при которой кусковатость разрушенной породы удовлетворяет предъявляемым выше требованиям.

Толщина штрипсовой пилы должна быть как можно меньшей, но ее жесткость достаточной для обеспечения направления резания и предотвращения искривления корпуса пилы. Размеры пилы устанавливаются специальным расчетом и регламентируются техническими условиями на серийное производство ТУ 2-037-102-73 «Штрипсы алмазные». Размеры брусков изменяются в узких пределах, и расстояние между брусками оказывает значительное влияние на второе слагаемое формул (97) и (98). С увеличением  $l_n$  второе слагаемое формул мощности резания и силы подачи уменьшается по закону дробно-линейной функции, при этом, если  $l_x = \text{const}$ , резко уменьшается разрушающая способность рабочей поверхности. Выбор  $l_n$  должен осуществляться с учетом износа инструмента [12].

Аналитическими исследованиями установлено, что с увеличением ширины алмазного диска мощность, расходуемая на разрушение, и усилие подачи возрастают линейно. С целью проверки этих исследований на полноразмерном стенде осуществлялось резание песчаника контактной прочностью 900 МН/м<sup>2</sup> алмазными дисками с постоянной характеристикой диаметром 800 мм. Для изменения ширины на ступицу планшайбы устанавливался сначала один диск, затем второй и третий. Опыт показал, что с увеличением ширины диска в 3 раза мощность возрастает для  $v_n = 0,011$  м/с в 2,4 раза, для  $v_n = 0,014$  м/с в 2,7 раза и для  $v_n = 0,022$  м/с в 2,6 раза, т. е. интенсивность роста мощности для исследованного диапазона скоростей подачи примерно одинакова. Удельные энергозатраты разрушения в этих условиях снижаются в 1,4 раза.

Усилия подачи с изменением ширины диска изменялись с меньшей интенсивностью для различных скоростей подачи.

Разрушение песчаника двумя алмазными дисками со встроенным между ними скальвателем показало, что с увеличением ширины щели между щелями снижение удельных затрат энергии на разрушение происходит более интенсивно, чем возрастание мощности резания, а при изменении ширины инструмента удельные затраты энергии на разрушение изменяются менее интенсивно, чем мощность резания (рис. 40). Следовательно, использование междисковых скальвующих устройств позволяет при незначительном увеличении мощности существенно снизить удельные энергозатраты на разрушение при одинаковых режимах резания.

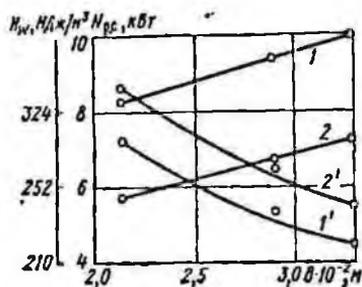


Рис. 40. Зависимости мощности резания  $N_{p.c}$  (1, 2) и удельных затрат энергии  $H_w$  (1', 2') на разрушение песчаника алмазным комбинированным диском от его ширины  $B$ :

1, 1' и 2, 2' — соответственно для скорости подачи  $1,1 \cdot 10^{-2}$  и  $1,4 \cdot 10^{-2}$  м/с (скорость резания 52 м/с, глубина резания 1,1 м)

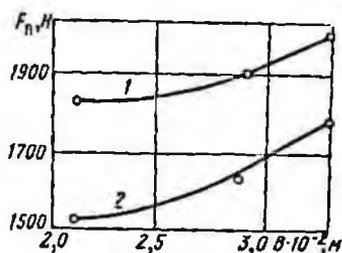


Рис. 41. Зависимости усилия подачи  $F_n$  от ширины комбинированного инструмента  $B$  при разрушении песчаника:

1, 2 — соответственно для скоростей подачи  $0,011$  и  $0,014$  м/с (скорость резания 52 м/с, глубина резания 0,1 м)

Анализ зависимости усилия подачи  $F_n$  от ширины комбинированного инструмента позволил установить его изменение в 1,18 раза для  $v_n=0,011$  м/с и в 1,10 раз для  $v_n=0,014$  м/с в том же диапазоне ширины инструмента; характер изменения усилия подачи с увеличением ширины щели идентичен характеру изменения мощности резания (рис. 41). Таким образом, подтверждена линейная зависимость силовых и энергетических показателей от ширины рабочей поверхности инструмента. Выявлено определенное отклонение от прямо пропорционального изменения этих величин, которое должно быть учтено в расчетных формулах. Так, в формулы для мощности необходимо ввести коэффициент влияния ширины инструмента  $K_{ш}=0,85$ , а в формулу для расчета силы подачи —  $K'_{ш}=1,2$ .

Так как значение коэффициентов  $K_{ш}$  и  $K'_{ш}$  обусловлено процессами, происходящими в зоне разрушения, и свойственно мелкоалмазной импрегнированной рабочей поверхности, то эти

коэффициенты без риска внести существенную погрешность можно использовать в формулах не только дискового, но и других типов инструмента. Однако для диска и штрипсовой пилы толщиной 7 мм и меньше, буровой коронки типа 1АГК диаметром 46 мм при толщине рабочего кольца 7 мм и меньше значение этих коэффициентов равно единице.

#### § 4. РЕЖИМЫ РАЗРУШЕНИЯ

Режимы разрушения горных пород алмазным инструментом характеризуются параметрами, от которых зависят эксплуатационные показатели его работы [6, 32]. Такими параметрами являются скорости подачи и резания, свойственные любому алмазному породоразрушающему инструменту независимо от его назначения и формы.

Бурение карагандинских песчаников контактной прочностью 1000—1500 МН/м<sup>2</sup> и абразивностью 0,20·10<sup>-2</sup>—0,28·10<sup>-4</sup> кг алмазными коронками типа 1АГК с различной зернистостью и концентрацией алмазов позволило установить влияние частоты вращения коронки на скорость бурения, потребляемую мощность на удельные затраты энергии на разрушение при различных осевых усилиях подачи. Бурение осуществлялось на стенде и в шахтных условиях коронками диаметром 46 мм с объемной концентрацией 12,5 и 25%, зернистостью А1000/800 и А1250/1000, с изменением скорости резания, усилия резания и усилия подачи. Как видно из рис. 42, при увеличении частоты вращения коронки скорость бурения увеличивается неравномерно. Если при увеличении частоты вращения от 126 до 210 рад/с скорость бурения растет с 0,18·10<sup>-2</sup> до 0,50·10<sup>-2</sup> м/с, т. е. почти в 3 раза, то при увеличении частоты вращения от 210 до 294 рад/с этот рост составляет от 0,50·10<sup>-2</sup> до 0,63·10<sup>-2</sup> м/с. Начиная с 273 рад/с, при усилии подачи в 3000 Н дальнейшее увеличение частоты вращения коронки практически

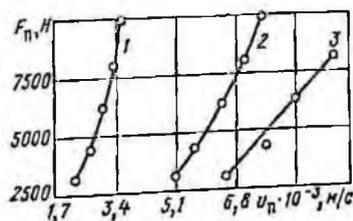
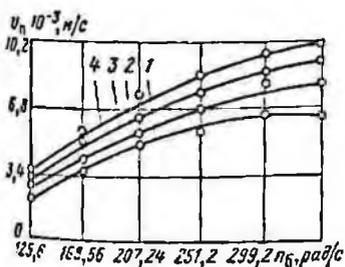


Рис. 42. Зависимости (1—4) производительности бурения от частоты вращения коронки 1АГК (А1250/1000, К25%) при усилиях подачи соответственно 3000, 4500, 6000 и 8000 Н

Рис. 43. Зависимости (1—3) силы подачи от скорости бурения коронкой 1АГК (А1250/1000, К25%) при частоте вращения соответственно 126, 210, 294 рад/с

не приводит к росту скорости бурения во всем исследованном диапазоне изменения сил подачи.

Рост производительности при увеличении скорости резания объясняется более интенсивным воздействием работающих алмазных зерен на поверхность забоя при удовлетворительном удалении продуктов разрушения из зоны контакта инструмента с породой. Но рост производительности с увеличением скорости резания постепенно замедляется из-за стабилизации и недостаточного внедрения алмазных зерен в массив.

Рост производительности при постоянной частоте вращения коронки обеспечивается увеличением силы подачи (рис. 43). При 126 рад/с увеличению производительности от  $0,20 \cdot 10^{-2}$  до  $0,35 \cdot 10^{-2}$  м/с соответствует увеличение силы подачи с 3000 до

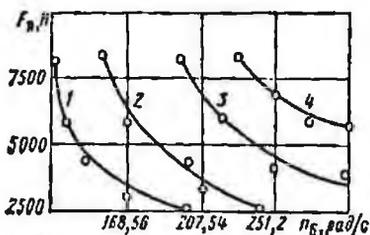


Рис. 44. Зависимости (1—4) силы подачи от частоты вращения коронки АГК (А1250/1000, К25%) при скорости бурения соответственно  $3,4 \times 10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $6,8 \cdot 10^{-3}$ ,  $8,3 \cdot 10^{-3}$  м/с

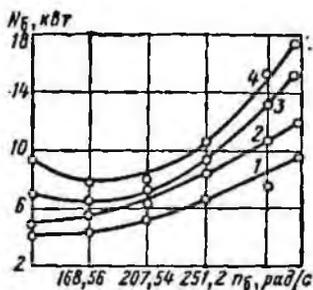


Рис. 45. Зависимости (1—4) мощности бурения от угловой частоты вращения коронки АГК (А1250/1000, К25%) при усилиях подачи соответственно 3000, 4500, 6000 и 8000 Н

10 000 Н, т. е. интенсивность увеличения силы подачи почти в 1,6 раза больше, чем при 294 рад/с. Увеличение частоты вращения не только повышает производительность бурения, но и обеспечивает меньшее влияние скорости бурения на силу подачи (рис. 44). В зоне сравнительно малой частоты вращения коронки (кривая 1) сила подачи изменяется резко, что неблагоприятно сказывается на работе привода исполнительного органа бурильной машины. При большой частоте вращения коронки этот параметр в меньшей мере влияет на силу подачи, что подтверждает целесообразность бурения горных пород средней крепости типа песчаников мелкоалмазными импрегнированными коронками при более высоких числах оборотов.

Частота вращения коронки и скорость бурения определяют энергетические показатели разрушения, которые являются исходными для прочностных расчетов и выбора мощности привода бурового оборудования.

Замедление роста мощности и даже ее снижение с увеличением частоты вращения коронки в некотором диапазоне (рис. 45) объясняется условиями выноса продуктов разрушения. Сила трения рабочей поверхности и боковых поверхностей коронки на 70—80% образуется за счет трения о продукты разрушения, от этой силы во многом зависит мощность, необходимая на вращение коронки. Увеличение частоты вращения коронки при прочих равных условиях способствует более быстрому выносу продуктов разрушения из зоны резания и тем самым улучшает условия работы алмазных зерен, уменьшение объема продуктов разрушения приводит к снижению сил трения. Это снижение сил трения в определенном диапазоне изменения частоты вращения коронки имеет превалирующее

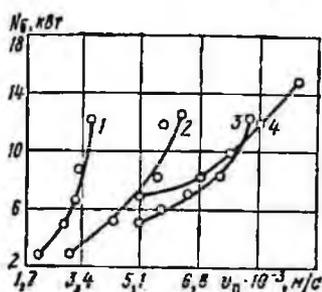


Рис. 46. Зависимости (1—4) мощности бурения от скорости бурения коронкой 1АГК (А1250/1000, К25%) при частоте ее вращения соответственно 126, 168, 210 и 294 рад/с

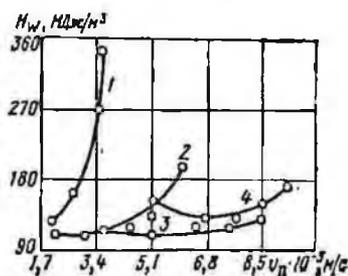


Рис. 47. Зависимости (1—4) удельных затрат энергии на разрушение от скорости бурения коронкой 1АГК (А1250/1000, К25%) при угловой частоте ее вращения соответственно 126, 168, 210 и 294 рад/с

значение в формировании мощности на разрушение. Поэтому с изменением частоты вращения от 126 до 210 рад/с при осевой силе 8000 Н мощность на разрушение несколько снижается. С дальнейшим ростом частоты вращения положительное влияние скорости резания, облегчающее вынос продуктов разрушения, оказывается недостаточным и мощность возрастает. Более быстрый рост мощности наблюдается при бурении с большими силами подачи. Это обусловлено большим заглублением в массив алмазных зерен и уменьшением зазора между неразрушенной породой и поверхностью матрицы коронки, что ухудшает условия распределения продуктов разрушения в зоне контакта инструмента с породой.

При постоянной частоте вращения коронки увеличение скорости бурения сопровождается ростом мощности на разрушение забоя (рис. 46). Чем выше частота вращения коронки, тем медленнее происходит изменение мощности, необходимой на

разрушение. Такая же закономерность ранее отмечена при анализе влияния производительности бурения на силу подачи (см. рис. 43). Это свидетельствует о сходном качественном влиянии режимов разрушения на силы резания и подачи. Расчеты показывают, что отношение силы подачи к силе резания в исследованном диапазоне изменяются в пределах 2,5—3,6; большее значение отношения соответствует частоте вращения 294 рад/с. На величину отношения силы подачи к силе резания оказывают влияние процесс отделения породы от забоя алмазными зернами и взаимодействие поверхности матрицы и корпуса коронки с поверхностью забоя и продуктами разрушения. Большая интенсивность роста мощности с увеличением скорости подачи при меньшей частоте вращения коронки обусловлена в основном действием второго фактора.

Наиболее представительным показателем, с помощью которого можно учесть влияние режимов разрушения, являются удельные затраты энергии на разрушение (рис. 47). Каждому минимуму удельных затрат на разрушение соответствует определенное соотношение скорости подачи коронки и скорости резания. Так, для кривой 4 рациональное отношение  $v_n/v_p = 1,11 \cdot 10^{-3}$ , для кривой 3 —  $1,01 \cdot 10^{-3}$ , для кривой 2 —  $0,83 \cdot 10^{-3}$  и для кривой 1 —  $0,67 \cdot 10^{-3}$ . Рациональное соотношение скоростей подачи и резания коронки изменяется в достаточно широких пределах, и чем выше скорость резания, тем соотношение больше. Это подтверждает вывод о существенном влиянии скорости резания на удаление продуктов разрушения из зоны контакта инструмента с породой; большая скорость резания улучшает удаление продуктов разрушения и позволяет увеличить скорость подачи, тогда как при меньшей частоте вращения коронки продукты разрушения удаляются хуже, поэтому относительная скорость подачи меньше.

Экспериментальные исследования влияния режимов разрушения на силовые и энергетические показатели при резании горных пород алмазным диском проводились на специальном полноразмерном стенде, который позволял плавно регулировать скорость подачи в широком диапазоне, а в качестве привода вращения алмазного диска применять как асинхронный электродвигатель серии КО мощностью 32 кВт и частотой вращения 157,5 рад/с, так и гидродвигатель типа ИМ-20 с устойчивым плавным регулированием частоты вращения от 15,8 до 168 рад/с, позволяющим получать мощность на инструменте до 50 кВт. Резанию в основном подвергались граниты, мраморы, песчаники и аргиллиты контактной прочностью от 500 до 1600 МН/м<sup>2</sup> и абразивностью от  $0,05 \cdot 10^{-4}$  до  $0,40 \cdot 10^{-4}$  кг, а также угли. В качестве инструмента использовался алмазный диск типа АОК-800 зернистостью А800/630—А630/500 и объемной концентрацией 12,5%.

Полученные зависимости мощности от глубины резания

для различных скоростей подачи и от скорости подачи для различных глубин резания показывают, что при изменении глубины резания от 30 до 240 мм мощность изменяется линейно для скоростей подачи от  $0,6 \cdot 10^{-2}$  до  $2,37 \cdot 10^{-2}$  м/с, а для скоростей подачи  $3,33 \cdot 10^{-2}$ ;  $4,17 \cdot 10^{-2}$ ;  $5,17 \cdot 10^{-2}$  и  $6,0 \cdot 10^{-2}$  м/с линейная зависимость сохраняется только до определенного значения глубины резания; дальнейшее увеличение глубины резания вызывает рост мощности по степенной зависимости с показателем степени больше единицы.

Изучение зависимости мощности резания от скорости подачи для различных глубин резания показало, что для глубины резания 100 мм мощность возрастает практически линейно до скорости подачи  $5,17 \cdot 10^{-2}$  м/с; при глубине резания 150 мм мощность примерно линейно возрастает с увеличением скорости подачи до  $3,33 \cdot 10^{-2}$  м/с и т. д., т. е. дальнейшее увеличение скорости подачи сопровождается значительным ростом мощности.

Таким образом, можно утверждать, что существуют некоторые значения скорости резания и подачи при прочих равных условиях, до которых мощность, расходуемая на резание, изменяется примерно линейно и дальнейшее увеличение одного или другого либо одновременно двух этих параметров вызывает резкое возрастание мощности.

В отношении зависимости удельных затрат энергии на разрушение от глубины резания при различных скоростях подачи и зависимости удельных затрат энергии от скорости подачи для различных глубин резания было установлено, что для определенных значений глубины резания и скорости подачи алмазного диска существует минимальная величина удельных затрат энергии разрушения.

Влияние скорости резания на потребляемую мощность и усилие подачи изучалось при постоянстве отношений между скоростями подачи и резания, т. е. при постоянной толщине стружки, что исключало влияние этого параметра на исследуемые величины. Для каждой из принятых глубин резания (100, 150, 200 и 250 мм) устанавливались зависимости энергетических и силовых показателей от скорости резания для различных соотношений скоростей подачи и резания.

На рис. 48 представлены кривые изменения мощности резания песчаника в зависимости от скорости резания, которая изменялась от 12 до 52 м/с, при этом глубина резания была постоянной. В пределах одной кривой отношение  $v_n/v_p$  не изменяется, чем достигается постоянство толщины срезаемой стружки, так что увеличение мощности разрушения вызвано только ростом скорости резания. Как видно, увеличение мощности резания происходит быстрее, чем изменения скорости резания. Снижение интенсивности роста мощности резания с увеличением величины стружки свидетельствуют о том, что при большой толщине стружки, приходящейся на каждое алмазное

зерно, более эффективно происходит удаление продуктов разрушения и меньшая их доля подвергается повторному перемельчению. Это справедливо только для тех режимов резания, при которых объем продуктов разрушения не препятствует отделению стружки алмазными зернами.

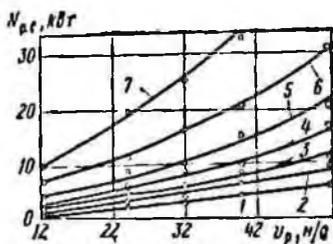


Рис. 48. Зависимости (1—7) мощности резания  $N_{p.0}$  от скорости резания  $v_p$  при отношении  $v_n/v_p \cdot 10^{-4}$  соответственно 2,1; 2,8; 4,2; 5,6; 7,0; 10,5 и 14,0 (глубина резания 0,25 м)

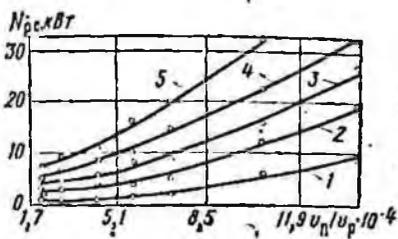


Рис. 49. Зависимости (1—5) мощности резания  $N_{p.0}$  от отношения  $v_n/v_p$  соответственно для скоростей резания 12, 24, 32, 40, 52 м/с (глубина резания 0,25 м)

Мощность резания зависит от отношения  $v_n/v_p$ , что видно из рис. 49. Поскольку величина  $v_n/v_p$  прямо пропорциональна толщине стружки, срезаемой алмазными зернами, эти зависимости можно одновременно рассматривать и в координатах мощность — толщина срезаемого слоя.

Анализ рис. 49 показывает, что изменение мощности в зависимости от отношения  $v_n/v_p$  при равных скоростях резания происходит с различной интенсивностью, причем при более высоких скоростях резания интенсивность роста потребляемой мощности меньше, чем при низких скоростях резания. С увеличением скорости резания более 32 м/с интенсивность изменения мощности практически остается постоянной. Поскольку в установившемся режиме работы инструмента мощность на вынос продуктов разрушения составляет не более 3—4% от мощности, затрачиваемой на преодоление сил трения, то ее не следует выделять как самостоятельную составляющую суммарной мощности разрушения. Тогда при одной и той же скорости подачи для большей скорости резания суммарная мощность разрушения будет больше на величину приращения мощности трения. Этот вывод подтверждается рис. 50, на котором приведены зависимости мощности разрушения песчаника от скорости подачи алмазного диска для различных скоростей резания при постоянной глубине резания.

Из рис. 50 видно, что сделанный вывод справедлив до тех пор, пока не происходит нарушение нормального режима резания, т. е. пока продукты разрушения не затрудняют отделения стружки алмазными зернами. Однако по мере роста скорости подачи объем продуктов разрушения и их давление, а следо-

вательно усилие трения, возрастают, что приводит к росту удельных затрат энергии. Нарушение нормальных режимов работы происходит раньше для меньшей скорости резания, вследствие чего начинается интенсивный рост потребляемой мощности. Отсюда видно, что увеличением скорости резания можно добиться снижения потребляемой мощности в том случае, если разрушение на меньшей скорости резания происходило не в рациональном режиме.

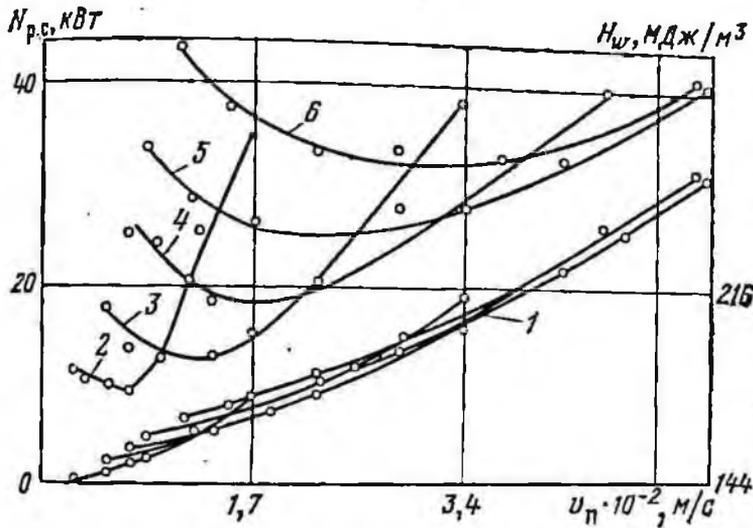


Рис. 50. Зависимости (1—6) мощности (кривые 1) и удельных затрат энергии (кривые 2—6) на разрушение песчаника от скорости подачи. Кривым 1—6 соответствуют скорости резания 12, 24, 32, 40, 52 м/с (глубина резания 0,25 м)

Если принимать во внимание только удельные затраты энергии, то целесообразно осуществлять разрушение на малых скоростях резания. Но малые скорости резания не позволяют работать в широком диапазоне скоростей подачи, так как сравнительно небольшое увеличение скорости подачи вызывает быстрый рост удельных энергозатрат. Увеличение скорости подачи от  $0,83 \cdot 10^{-2}$  до  $1,67 \cdot 10^{-2}$  м/с при скорости резания 12 м/с вызывает рост  $H_w$  с 180 до 270 МДж/м<sup>3</sup>, тогда как при скорости резания 52 м/с изменение скорости подачи от  $2,5 \cdot 10^{-2}$  до  $5,3 \cdot 10^{-2}$  м/с вызывает рост  $H_w$  с 259 до 295 МДж/м<sup>3</sup>. Кроме того, рост  $v_p$  с 12 по 40 м/с позволяет при рациональных режимах увеличить производительность резания от  $0,21 \cdot 10^{-2}$  до  $0,6 \cdot 10^{-2}$  м/с. При этом мощность резания возрастает с 2,5 до 10 кВт, а удельные энергозатраты увеличиваются только на 30%. Это доказывает, что при резании пород алмазным диском целесообразно применять высокие скорости резания. Аналогичные зависимости потребляемой при разрушении мощности и удельных энергозатрат от скоростей резания и подачи, а также

от соотношения между ними имеют место при разрушении песчаника на глубинах резания, равных 100, 150 и 200 мм. Для алмазного диска мощность резания пропорциональна длине дуги его контакта с разрушаемым массивом.

Получены следующие результаты расчета длины дуги контакта алмазного диска с породой в зависимости от глубины резания для диска радиусом  $R=400$  мм:

Глубина резания $H$ , мм . . . . .	50	100	150	200	250	300	400	800
Центральный угол $\varphi$ , рад . . . . .	0,50	0,72	0,90	1,05	1,19	1,32	1,57	3,14
Длина дуги контакта $l_k$ , мм . . . . .	200	288	360	420	476	528	628	1256

Из приведенного выше видно, что глубина резания растет быстрее длины дуги контакта диска с породой. Отставание в росте длины контакта от глубины резания приводит к тому, что потребляемая мощность, пропорциональна  $R\varphi$ , также возрастает медленнее глубины резания. Например, увеличение глубины резания в 2,5 раза (от 100 до 250 мм) при отношении  $v_n/v_p = 1,04 \cdot 10^{-3}$  вызывает рост мощности резания в 1,77 раза (от 13 до 23 кВт).

Отставание роста потребляемой мощности от глубины резания является одной из причин того, что с увеличением глубины резания удельные затраты энергии разрушения уменьшаются.

При одной и той же установленной мощности привода в некоторых случаях увеличения производительности, т. е. максимально возможной скорости подачи, можно достигнуть за счет повышения скорости резания. Иными словами, между скоростями подачи и резания не только обнаружена пропорциональная зависимость, что в общем-то характерно для режущего органа, но наблюдается также снижение потребляемой мощности при более высокой скорости подачи. Когда при определенной скорости резания скорость подачи имеет нерациональную величину, мощность, потребляемая алмазным диском, а также удельные затраты энергии разрушения возрастают. При этом небольшое увеличение скорости подачи приводит к значительному росту потребляемой мощности (см. рис. 50). Алмазный диск начинает работать в режиме с большим расходом энергии на преодоление сил трения. Увеличение же скорости резания улучшает распределение и вынос продуктов разрушения из зоны резания, и мощность, необходимая для обеспечения той же производительности, снижается. Аналогичная особенность отмечается и при бурении.

С практической точки зрения представляет интерес определение наиболее выгодного соотношения между скоростями подачи и резания, при котором будет иметь место максимальная производительность в заданных условиях. Отношение скорости подачи и скорости резания, пропорциональное толщине стружки, срезаемой алмазными зёрнами, является, таким образом, важным технологическим параметром.

Наряду с мощностью, потребляемой при разрушении, усилие

подачи является важным показателем процесса разрушения горных пород, знать который необходимо при конструировании исполнительных органов. На величину усилия подачи оказывают основное влияние скорость резания, скорость подачи, глубина, а также физико-механические свойства разрушаемых пород.

Усилие подачи, действующее на алмазный диск при разрушении песчаника, в зависимости от скорости резания (рис. 51) увеличивается с ростом скорости резания при неизменном отношении  $v_n/v_p$ , что объясняется возрастанием давления разрушенной породы на рабочую поверхность алмазного диска. В связи с тем, что составляющая усилия подачи, возникающая при внедрении алмазных зерен в разрушаемый массив, не зависит от скорости резания, при  $v_n/v_p = \text{const}$  суммарное его значение с ростом скорости резания увеличивается менее интенсивно, чем составляющая усилия подачи, обусловленная давлением продуктов разрушения, особенно при больших величинах отношения  $v_n/v_p$ . Снижение интенсивности роста усилия подачи с увеличением отношения  $v_n/v_p$  показывает, что скорость резания при больших значениях  $v_n/v_p$  влияет на усилие подачи незначительно. Это явление уже наблюдалось при анализе энергетических зависимостей и объясняется оно тем, что с увеличением отношения  $v_n/v_p$ , а следовательно и толщины срезаемого слоя алмазными зернами, доля сил трения и давления на связку в суммарных усилиях резания и подачи уменьшается.

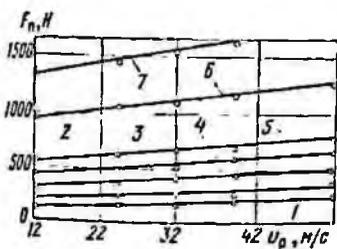


Рис. 51. Зависимости (1—7) усилия подачи  $F_n$  при резании песчаника от скорости резания  $v_p$  соответственно при отношении  $v_n/v_p \cdot 10^{-4}$  2,1; 2,8; 4,2; 5,6; 7,0; 10,5 и 14,0 (глубина резания 0,25 м)

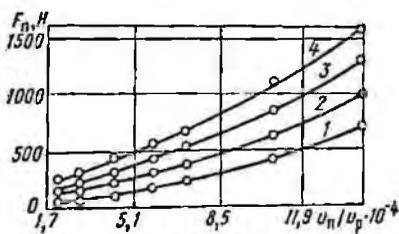


Рис. 52. Зависимости (1—4) усилия подачи  $F_n$  при резании песчаника от соотношения  $v_n/v_p$  при глубине резания соответственно 0,1, 0,15, 0,2 и 0,25 м (скорость резания 40 м/с)

Увеличение отношения  $v_n/v_p$  также вызывает рост усилия подачи, при этом зависимость усилия подачи от отношения  $v_n/v_p$  аналогична зависимости потребляемой мощности от этого же параметра.

Идентичные результаты были получены для других глубин резания, причем оказалось, что глубина резания влияет только на усилие подачи, тогда как качественного изменения представленные выше зависимости не претерпевают.

На рис. 52 видно, что увеличение глубины резания приводит к росту усилия подачи. Для других скоростей резания характер представленных зависимостей не изменяется.

Таким образом, из проведенного анализа видно, что влияющие режимы резания на усилие подачи аналогично их влиянию на потребляемую мощность. Сказанное иллюстрируется на рис. 53, где представлены осциллограммы записи усилия подачи и давления в гидросистеме привода алмазного диска при

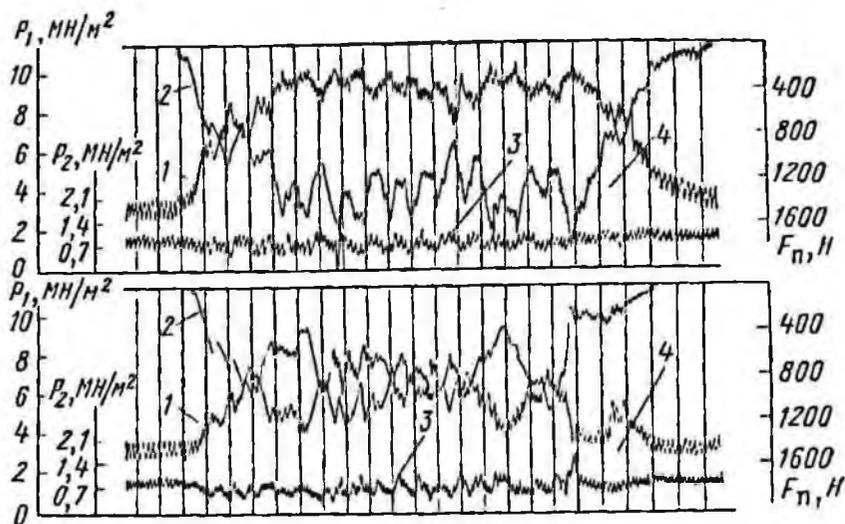


Рис. 53. Осциллограммы усилий подачи и давлений в гидросистеме привода алмазного диска (глубина резания 0,1 и 0,2 м);

1, 3 — давление соответственно в напорной и сливной магистралях; 2 — усилие подачи; 4 — скорость резания

разрушении песчаника для глубины резания, равной 100 и 200 мм. Причем нулевая линия усилия подачи находится в верхней части, а для остальных величин — в нижней части осциллограмм. Как видно из приведенных осциллограмм, кривые усилия подачи и напорного давления, пропорционального усилию резания и мощности разрушения, хорошо соответствуют друг другу, так что рост или снижение обоих усилий происходит одновременно.

Рассматривая траектории движения точек рабочей поверхности инструмента и характер взаимодействия отдельных алмазных зерен с породой, нетрудно установить наличие двух существенно отличных друг от друга периодов работы алмазного зерна. Первый характеризуется незначительным заглублением зерна и соответствует начальному участку дуги контакта при углах  $\varphi$  от 0 до 0,17—0,26 рад. Затем наступает второй период,

когда величина заглубления быстро нарастает и достигает максимального значения на выходе из контакта. Установлено [25], что при малых заглублениях зерна из-за его сферической формы происходит не резание породы, а дробление и истирание без формирования крупных элементов стружки. Очевидно, что такой процесс разрушения сопровождается весьма высокими затратами энергии. Поэтому, чем меньшую долю на длине дуги контакта составляет ее участок, где алмазные зерна имеют незначительное заглубление, тем ниже удельные затраты энергии на разрушение. Если при глубине резания 100 мм этот участок составляет 30%, то при глубине 250 мм — примерно 10%, что вызывает снижение удельных энергозатрат на 20—25% (с 486 до 360 МДж/м<sup>3</sup>). Это дает основание при выборе параметров разрушения задаваться максимально возможной глубиной резания, что снижает удельные затраты энергии на разрушение. Мощность на резание прямо пропорциональна дуге контакта инструмента с породой, поэтому при разработке программы автоматического управления работой исполнительного органа целесообразно в качестве переменного параметра пользоваться углом контакта  $\varphi$ .

При бурении и резании диском пород с большей контактной прочностью имели место качественно аналогичные зависимости показателей разрушения от режимных параметров.

Количественные различия находятся в соответствии с контактной прочностью. Это подтверждает правильность полученных аналитических зависимостей для расчета мощности и действующих сил. Однако обнаружены и некоторые особенности, которые не могут быть объяснены с помощью полученных формул. В качестве примера на рис. 54 приведены зависимости мощности резания и удельных

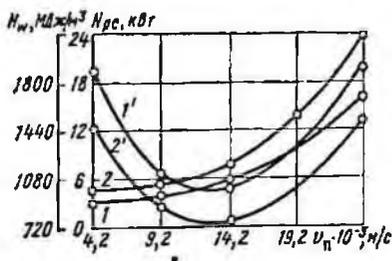


Рис. 54. Зависимость мощности резания  $N_{p,с}$  и удельных затрат энергии  $H_w$  на разрушение курдайского гранита от скорости подачи  $v_p$  соответственно при глубине резания 0,5 м (кривые 1 и 1') и 0,1 м (кривые 2 и 2') ( $v_p = 40$  м/с,  $b = 0,007$  м,  $R = 0,4$  м,  $K_0 = 12,5\%$ )

затрат энергии на разрушения курдайского гранита от скорости подачи. Контактная прочность гранита составляет 2500 МН/м<sup>2</sup>, что в 2,5 раза больше, чем  $P_k$  карагандинского песчаника.

Сравнивая результаты экспериментов, приведенные на рис. 48, 49 и 54, следует отметить, что как для глубины резания 50 мм, так и для глубины резания 100 мм в диапазоне увеличения скоростей подачи от  $0,5 \cdot 10^{-2}$  до  $1,42 \cdot 10^{-2}$  м/с количественный рост мощности резания происходит примерно с одинаковой интенсивностью. Так, для  $H = 50$  мм  $N_{p,с}$  увеличивается для пес-

песчаника и гранита соответственно в 1,35 и 1,4 раза. Однако начиная с  $v_n = 1,42 \cdot 10^{-2}$  м/с функция  $N_{p.c} = f(v_n)$  при резании гранита возрастает с большей интенсивностью, чем при резании песчаника на тех же режимах. В рассматриваемых режимах мощность резания песчаника примерно в 2 раза меньше мощности, расходуемой на резании гранита, а так как применялся один и тот же инструмент, то различие вызвано влиянием механических свойств пород. Принимая во внимание, что гранит резался с меньшей скоростью резания, можно считать пропорциональное влияние  $P_n$  на  $N_{p.c}$  экспериментально доказанным.

Анализ изменения удельных энергозатрат в зависимости от скорости подачи (см. рис. 54) показывает, что качественный характер функции  $H_w = f(v_n)$  при резании гранита и песчаника одинаков. Минимальное значение удельных энергозатрат разрушения гранита при глубине резания 100 мм составило 720 МДж/м<sup>3</sup>, а при разрушении песчаника 274 МДж/м<sup>3</sup>, что пропорционально контактной прочности и соответствует ранее полученным формулам. Но если для песчаника рациональная скорость подачи составила  $4,17 \cdot 10^{-2}$  м/с, как по экспериментальным данным, так и в результате расчета по формуле (34), то для гранита расчеты дают значение  $v_n = 3,17 \cdot 10^{-2}$  м/с, а эксперименты  $1,25 \cdot 10^{-2}$  м/с (см. рис. 54), что в 2,4 раза меньше расчетного значения.

Сопоставление данных по бурению песчаника, изложенных выше, с результатами анализа использования алмазных коронок при бурении пород с контактной прочностью 2500 МН/м<sup>2</sup> и выше, выполненного Всесоюзным научно-исследовательским институтом методики и техники разведки [23, 32], позволило установить, что при бурении крепких пород рациональная скорость бурения, рассчитанная по формуле (36), выше фактически достигнутой. Следовательно, механические свойства пород, в частности контактная прочность, влияют не только на абсолютную величину показателей разрушения, но и изменяют разрушающую способность инструмента, что необходимо учитывать при выборе режимов в расчете показателей работы.

Исследованию влияния режимов работы на силовые и энергетические показатели разрушения пород штрипсовыми пилами предшествовал выбор инструмента с рациональными расстояниями между брусками  $l_n$ . Для этого на станке КС-1 осуществлялось резание яшчевского гранита с контактной прочностью  $P_n = 3100$  МН/м<sup>2</sup> тремя типами инструмента при  $l_{бр}/l_{бр} + l_n$ , равном соответственно 0,3; 0,4 и 0,6. Резание осуществлялось в режиме самозатачивания, алмазные бруски имели зернистость А630/500 и концентрацию 12,5%. Выполнением этих исследований предусматривались проверка правильности формулы (43) и оценка возможности выбора расстояния между брусками на основании энергетических показателей разрушения. При отно-

шенин  $l_{бр}/l_{бр} + l_n$ , равном 0,4 и 0,6, с увеличением скорости подачи мощность возрастает по закону, близкому к параболическому, примерно с одинаковой интенсивностью. Но при  $l_{бр}/l_{бр} + l_n$ , равном 0,3, интенсивность роста мощности резко возрастает для значений  $v_n > 0,22 \cdot 10^{-3}$  м/с. Удельные затраты энергии при этом для трех значений расстояний между брусками с увеличением  $v_n$  от  $0,006 \cdot 10^{-3}$  до  $0,060 \cdot 10^{-2}$  м/с сначала снижаются, достигая минимума, а затем возрастают. Если для кривой 1 наблюдается незначительный рост удельных энергозатрат с  $v_n = 0,044 \cdot 10^{-3}$  м/с, то для кривых 2 и 3, при сравнительно близких значениях минимума удельных затрат энергии (2700 и 2880 МДж/м<sup>3</sup>), величина скорости подачи, соответствующая минимуму удельных энергозатрат, соответственно равна  $0,042 \times 10^{-3}$  и  $0,022 \cdot 10^{-3}$  м/с.

Следовательно, из трех типов инструмента лучшие результаты по удельным затратам энергии показала штрипсовая пила, для которой соотношение  $l_{бр}/l_{бр} + l_n = 0,4$ . Она позволяет при рациональной скорости подачи обеспечить почти в 2 раза большую производительность, чем пила с соотношением  $l_{бр}/l_{бр} + l_n = 0,6$ . Поэтому дальнейшие работы проводились с этим инструментом.

Влияние  $v_n$  на энергетические показатели изучалось на четырех типах пород с существенно отличающимися механическими свойствами: янцевский гранит, головинский лабрадорит, коелгинский мрамор и бодракский известняк, контактная прочность которых соответственно равна 3100, 2000, 1300 и 500 МН/м<sup>2</sup>. Штрипсовая пила была оснащена алмазными брусками зернистостью А630/500 с объемной концентрацией алмазов 12,5%. Наименьшее значение скорости подачи устанавливалось примерно в 2 раза меньшим, чем обычно применяемое для данного типа пород, а наибольшее зависело от устойчивости процесса резания, который определяется жесткостью инструмента и исполнительного органа. В наших условиях для гранита и лабрадорита минимальная скорость подачи была равна  $0,007 \times 10^{-3}$ , а максимальная  $0,060 \cdot 10^{-3}$  м/с, для известняка и мрамора — минимальная  $0,044 \cdot 10^{-3}$ , а максимальная  $0,14 \cdot 10^{-3}$  м/с. Такой диапазон изменения скоростей подачи позволил выявить характерные закономерности влияния  $v_n$  на  $N_{р.п}$  и  $H_{р.п}$ .

Результаты исследований отражены на рис. 55 и 56, из которых видно близкое к параболическому возрастание мощности резания с увеличением скорости подачи. Изменение мощности резания известняка и мрамора примерно аналогично до  $v_n = 0,097 \cdot 10^{-3}$  м/с, при резании же гранита и лабрадорита возрастание мощности с увеличением скорости подачи превышает с большей интенсивностью, если скорость подачи превышает  $0,042 \cdot 10^{-3}$  м/с. Следовательно, для всех исследуемых горных пород существуют такие значения  $v_n$ , после достижения которых мощность резания увеличивается с большей интенсивно-

стью. Такая же закономерность была нами ранее установлена при исследовании влияния скорости подачи применительно к буровой коронке и режущему диску. Количественные различия в значениях мощности для четырех типов пород пропорциональны контактной прочности.

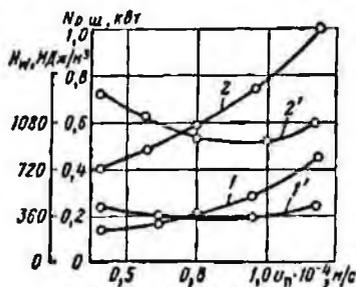


Рис. 55. Зависимости (1, 2) мощности резания  $N_{p, ш}$  и удельных затрат энергии  $H_w$  ( $1', 2'$ ) от скорости подачи  $v_p$  при разрушении бодракского известняка и колгнисского мрамора штрипсовым инструментом ( $v_p = 0,5$  м/с;  $b = 0,007$  м;  $l_0 = 1$  м;  $l_x = 0,15$  м; А630/500;  $K_0 = 12,5\%$ )

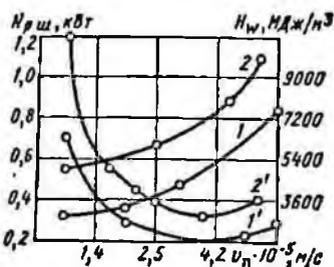


Рис. 56. Зависимости (1, 2) мощности резания  $N_{p, ш}$  и удельных затрат энергии  $H_w$  ( $1', 2'$ ) от скорости подачи  $v_p$  при разрушении головинского лабрадорита и янцевского гранита штрипсовым инструментом ( $v_p = 0,5$  м/с;  $b = 0,007$  м;  $l_0 = 1$  м;  $l_x = 0,15$  м; А630/500;  $K_0 = 12,5\%$ )

Удельные энергозатраты на резание гранита, лабрадорита (см. рис. 56), мрамора и известняка (см. рис. 55) с увеличением скорости подачи инструмента сначала снижаются, достигая минимума, а затем возрастают. Для гранита, лабрадорита, мрамора и известняка скорости подачи, при которых удельные энергозатраты минимальны, соответственно равны  $0,039 \cdot 10^{-3}$ ;  $0,044 \cdot 10^{-3}$ ;  $0,097 \cdot 10^{-3}$  и  $0,11 \cdot 10^{-3}$  м/с. Эти скорости подачи и являются рациональными.

Полученные результаты показывают, что с увеличением контактной прочности  $P_k$  величина рациональной скорости подачи уменьшается. Такое же явление было установлено и при разрушении горных пород режущими дисками и буровыми коронками, которое подтверждает для трех типов исследуемых инструментов снижение разрушающей способности рабочей поверхности с увеличением контактной прочности породы. Если принять скорости подачи, рассчитанные по формулам (33), (36) и (39), за единицу для  $P_k = 500 \div 700$  МН/м<sup>2</sup>, то в эти формулы необходимо ввести коэффициент, учитывающий влияние прочности горных пород на разрушающую способность алмазного инструмента. Изменение коэффициента прочности  $\beta_p$  в зависимости от  $P_k$  хорошо аппроксимируется функцией типа локон Аньези.

Обработкой экспериментальных значений рациональных скоростей подачи для трех типов инструмента в диапазоне изменения  $P_n$ , от 50 до 350 кгс/мм<sup>2</sup> получено выражение для  $\beta_n$ :

$$\beta_n = \frac{1,4}{1,25 + 0,5 \cdot 10^{-4} P_n^2} \quad (100)$$

Следовательно, в формулы (33), (36) и (39) необходимо ввести коэффициент прочности  $\beta_n$ , тогда формулы для рациональной скорости подачи примут вид:

для режущего диска

$$v_n = \frac{0,78 r v_p \beta_n}{C_p R \Phi} (1 - 1 \cdot 10^{-3} K_o), \text{ м/с;} \quad (101)$$

для буровой коронки

$$v_n = 0,25 \frac{r v_p \beta_n}{C_p (R_n + R_{вн})} (1 - 1 \cdot 10^{-3} K_o), \text{ м/с;} \quad (102)$$

для полосовой пилы

$$v_n = \frac{0,6 r v_p \beta_n \left(1 - \frac{l_n}{l_{бр} + l_n}\right)}{l_x C_p} (1 - 2,37 \cdot 10^{-3} K_o), \text{ м/с.} \quad (103)$$

Таким образом, определены численные значения суммарной мощности разрушения и сил подачи, выявлены качественные и количественные взаимосвязи между ними. Установлено наличие минимума удельных энергозатрат на разрушение, что связано с процессами трения рабочей поверхности инструмента о продукты разрушения и породный массив. Показана необходимость учета прочности горных пород при оценке разрушающей способности инструмента.

## § 5. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И СИЛ ПОДАЧИ

Расчету силовых и энергетических показателей предшествуют анализ горнотехнических условий, определение физико-механических свойств породы, выбор характеристики инструмента и назначение режимов работы.

При анализе горнотехнических условий обращается внимание на характер использования инструмента: бурение шпуров, вырезание блоков из массива, прорезание с последующим отделением междуцелевых целиков. В результате осуществляется выбор геометрии и типа инструмента: коронка, полосовая пила или режущий диск. Ранее было показано, что применительно к процессу разрушения пород мелкоалмазным импрегнированным инструментом наиболее приемлемыми показателями физико-механических свойств являются контактная прочность  $P_{к}$ .

абразивность  $a$ , коэффициенты трения алмазного зерна о породу  $f_{тр}$  и связки о породу и продукты разрушения  $f_{св}$ . Контактная прочность и абразивность пород определяется сравнительно легко с помощью несложного оборудования и не требует трудоемкой подготовки образцов для испытания [5]. Контактная прочность имеет довольно тесную корреляционную связь с временным сопротивлением одноосному сжатию, с твердостью по штампу  $R_{ш}$  и коэффициентом крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова. Разрушению подвергались гранит, кварцит, лабрадорит, мрамор, песчаники трех разновидностей, алевролит, аргиллит и уголь. Контактная прочность и абразивность этих пород изменялись в пределах соответственно 400—2500 МН/м<sup>2</sup> и 0,05·10<sup>-4</sup>—0,45·10<sup>-4</sup> кг. Величина коэффициента трения алмазного зерна о породу  $f_{тр}$  определялась многими исследователями [13, 21] и с достаточной точностью может быть принята равной 0,35. Несколько сложнее обстоит дело с величиной коэффициента трения  $f_{св}$ . Если твердость минеральных частиц, слагающих породу, выше, чем твердость связки алмазосодержащего слоя, то продукты разрушения будут производить микроцарапание связки и в этом случае величина  $f_{св}$  достигает 0,5. Это имеет место при резании горных пород с абразивностью более 0,15·10<sup>-4</sup> кг инструментом, имеющим как твердую, так и мягкие связки. К таким породам относятся граниты, кварциты и песчаники. При разрушении пород типа глинистых сланцев или мрамора, у которых абразивность меньше 0,15·10<sup>-4</sup> кг, процесс напоминает граничное трение и  $f_{св}$  находится в пределах 0,25—0,3.

Выбор параметров инструмента осуществляется в следующей последовательности. Выбираются зернистость и концентрация алмазов на основании критерия наибольшей производительности и общих соображений, изложенных в § 3 настоящей главы. Тогда для буровых коронок рациональная зернистость составляет А1000/800, А1250/1000, для режущих дисков и полосовых пил — А630/500, А800/630. При этом концентрация алмазов не должна быть меньше  $K_{пил}$ , определенной по формуле (99).

Для указанных зернистостей объемная концентрация составляет для буровых коронок 12,5—25%, режущих дисков и полосовых пил — 6,25—12,5%. Расчеты показывают, что коэффициент в численно равен  $\beta_n$ , который рассчитывается по формуле (100).

Диаметры коронок и дисков зависят от значения исполнительного органа и предъявляемых к нему требований. Наиболее распространенные диаметры буровых коронок — 46, 59 и 76 мм, а диаметры режущих дисков — 500, 800, 1000, 1100 мм. Толщина стенок коронки и корпуса дисков определяется нормами. В отдельных случаях применяют алмазные инструменты, не соответствующие нормам, что обусловлено специфическими

требованиями к его работе. К таким инструментам относятся широкие режущие диски, оснащенные специальными скальвателями или без них, пустотелые коронки или диски для работы без охлаждения или в тяжелых температурных условиях.

Назначение режимов работы инструмента следует начинать со скорости резания. Так как для мелкоалмазного импрегнированного инструмента производительность пропорциональна скорости резания, то следует работать на максимально возможных скоростях.

Исследованиями авторов и других ученых выявлены следующие факторы, ограничивающие верхний предел скорости резания: механическая прочность и жесткость корпуса инструмента, а также прочность крепления алмазных сегментов к корпусу, на которые воздействуют центробежная сила возможности привода, температура в зоне контакта инструмента с породой, износ инструмента.

Конструкция и прочностные характеристики буровых коронок позволяют работать со скоростями резания порядка 50—60 м/с, но обычно коронки имеют скорость в несколько раз меньшую. Имеются данные [7] об удовлетворительной работе алмазных режущих дисков при скорости резания 100 м/с, прочность же конструкции позволяет им работать при скорости 150 м/с. Жесткость режущих дисков и коронок вполне достаточна для работы на высоких скоростях, и препятствуют этому погрешности монтажа инструмента, неуравновешенность привода и трансмиссии. В исполнительных органах, оснащенных режущими дисками, трансмиссии, как правило, характеризуются высокой жесткостью и не препятствуют работе инструмента с высокими скоростями. При бурении коронками буровой став имеет малую жесткость и с увеличением глубины бурения жесткость снижается, что при увеличении угловой частоты вращения коронки вызывает вибрации, которые ограничивают скорости резания. Для буровых станков, оснащенных алмазными коронками, скорость резания не превышает 4 м/с. При опытном бурении песчаников устойчивая работа коронки наблюдалась даже при скорости резания 8 м/с, но для глубины бурения, не превышающих 3 м. В гл. 2 установлено, что при разрушении режущими дисками пород с контактной прочностью 500—1500 МН/м<sup>2</sup> и абразивностью  $0,15 \cdot 10^{-4}$ — $0,35 \cdot 10^{-4}$  кг рациональная скорость резания находится в пределах 40—60 м/с, при этом износостойкость инструмента наибольшая. При резании хрупких пород типа известняков, туфов, имеющих малую абразивность, скорость резания целесообразно увеличивать до 70 м/с, а при резании твердых пластичных пород с  $P_{\text{к}} > 1500$  МН/м<sup>2</sup>, даже если их абразивность не превышает  $0,20 \cdot 10^{-4}$  кг, скорость резания следует принимать в пределах 30—40 м/с. При бурении исследовался диапазон скорости резания от 2,5 до 8 м/с. В этих пределах скорость резания оказывает на износ коронок малое влияние.

Так, при увеличении скорости резания в 3 раза производительность бурения увеличилась в 4 раза, а износ возрос на 20%.

Таким образом, при выборе скорости резания для алмазных дисков следует руководствоваться минимальным износом, а для алмазных коронок — технической возможностью станков и жесткостью бурового става, т. е. для алмазной коронки типа 1АГК диаметром 46 мм изменение частоты вращения от 126 до 294 рад/с не вызвало существенного увеличения износа по сравнению с выигрышем в производительности.

При выборе скоростей подачи и бурения необходимо определить рациональные их значения по формулам (101) — (103). Если для дискового и штрипового инструмента рассчитанные значения скоростей подачи практически совпадают с экспериментальными, которым соответствует минимум удельных энергозатрат, то расчетные скорости бурения превышают экспериментальные на 60%, что показано в § 4 настоящей главы. Такое различие обусловлено худшими условиями для удаления продуктов разрушения из зоны контакта инструмента с породой при бурении, чем при прорезании щелей дисковым и штриповым инструментом. Поэтому (102) примет вид

$$v_n = \frac{0,25v_p \beta_n (1 - 1 \cdot 10^{-3} K_n)}{C_p (R_n + R_{min}) K_b}, \text{ м/с}, \quad (104)$$

где  $K_n$  — коэффициент, учитывающий условия выноса продуктов разрушения из зоны резания буровой коронкой. Для дискового и штрипового инструмента  $K_n = 1,0 \div 1,1$ , для буровой коронки  $K_n = 1,6$ .

При разрушении породы алмазным диском небольшая часть продуктов разрушения подвергается вторичному измельчению и они легче вымываются охлаждающей жидкостью из зоны разрушения. В связи с тем, что при бурении вся рабочая поверхность инструмента непрерывно контактирует с забоем, создаются более благоприятные условия по сравнению с дисковым инструментом для образования локальных скоплений измельченной породы, что препятствует внедрению алмазных зерен в неразрушенный массив.

Для дискового инструмента величина контакта с породой рассчитывается по формулам:

при  $H \leq R$

$$\varphi = \arccos \left( \frac{R - H}{R} \right);$$

при  $H > R$

$$\varphi = \left[ \frac{\pi}{2} + \arcsin \left( \frac{R - H}{R} \right) \right]. \quad (105)$$

Если разрушению подвергаются породы типа песчаников или известняков алмазным инструментом, характеристика которых соответствует  $K_0 = 6,25 \div 12,5\%$ , А630/500 ÷ А800/630 для дисков

при глубине  $H=150\div 200$  мм и  $K_0=12,5\div 25\%$ , А1000/800  $\div$  А1250/1000 для буровых коронок диаметром 46 мм, можно пользоваться соотношением  $v_n/v_p=0,56\cdot 10^{-3}$  для дисков и  $v_n/v_p=1,04\cdot 10^{-3}$  для коронок, что упрощает расчеты.

Как показано в § 1 и 2 настоящей главы, для расчета мощности необходимо в аналитическое выражение подставить величину  $P_{уд}$ . Определить последнюю можно на основании экспериментальных исследований по величине мощности трения, которая находится как разность между общей мощностью, расходуемой на разрушение, и мощностью на резание породы

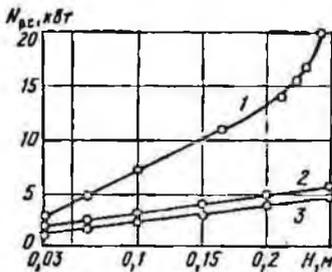


Рис. 57. Зависимости мощности резания песчаника от глубины резания при скорости подачи  $v_n=3,4 \times 10^{-2}$  м/с:

1 — экспериментальная мощность; 2 и 3 — расчетные значения составных частей мощности соответственно  $N_{р.з}+N_k$  и  $N_{р.з}$

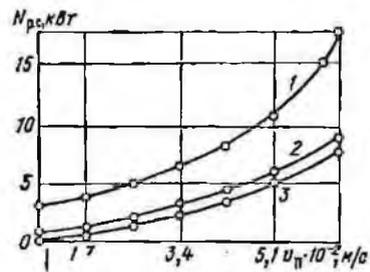


Рис. 58. Зависимости мощности резания песчаника от скорости подачи при  $H=0,1$  м:

1 — экспериментальная мощность; 2, 3 — расчетные значения составных частей мощности соответственно  $N_{р.з}+N_k$  и  $N_{р.з}$

алмазными зернами. При разрушении породы алмазными дисками, работающими с высокими скоростями резания, из общей мощности следует вычитать мощность, расходуемую на вынос продуктов разрушения. Но этой величиной при скоростях резания до 60 м/с можно пренебречь, так как ее значение не превышает 5%. Применительно к бурению и резанию дисками и штрипсами, воспользовавшись экспериментальными значениями мощности и первыми слагаемыми (65), (96) и (98), можно определить мощность трения, а следовательно, и  $P_{уд}$ . Аналогичный прием справедлив и в отношении сил подачи.

Принимая во внимание, что закономерности формирования силовых и энергетических показателей разрушения пород алмазными коронками, дисками и штрипсами примерно одинаковы, определим  $P_{уд}$ . Для этого по экспериментальным данным построим зависимости мощности резания (кривые 1) от глубины резания и скорости подачи (рис. 57 и 58). С помощью аналитических формул построены аналогичные зависимости мощности, необходимой на разрушение песчаника алмазными

зернами (кривые 3), и мощности, необходимой на разрушение песчаника алмазными зернами и на сообщение продуктам разрушения определенной кинетической энергии, достаточной для выноса их из зоны резания (кривые 2). Кривые 2 и 3 построены для тех же параметров, какие использовались при построении кривых 1. Скорость резания была постоянной (равна 60 м/с), диаметр диска 800 мм,  $K_0 = 12,5\%$ . А800/630, разрушался песчаник с контактной прочностью 720 МН/м<sup>2</sup>.

Мощность резания во всем диапазоне изменения глубины резания возрастала линейно благодаря росту числа алмазных зерен, участвующих в разрушении. Мощность  $N_{р,з}$  прямо пропорциональна площади контакта диска с породой  $R_{фb}$ , т. е. кривая 3 выражает косинусоиду. В исследованном диапазоне глубины резания эта косинусоида близка к прямой.

Разность между общей мощностью, которую характеризует кривая 1, и мощностью  $N_{р,з} + N_{и}$ , которую характеризует кривая 2, определит мощность, расходуемую на вредные сопротивления. Эти сопротивления возникают за счет сил трения поверхности связи о продукты разрушения и о забой при их относительном перемещении.

Мощность резания с увеличением скорости подачи согласно формуле (61) возрастает по кривой, близкой к параболе; при постоянной глубине резания мощность  $N_{и}$  изменяется линейно в зависимости от скорости подачи.

Расчеты показывают, что мощность, необходимая на вынос продуктов разрушения из зоны резания, в зависимости от режимов работы составляет примерно 1—5% общей мощности разрушения. Следовательно, основные затраты энергии идут на отделение стружки алмазными зернами с поверхности забоя и трение инструмента о забой и продукты разрушения, мощность трения определяется из уравнения (65), а результаты расчетов приведены ниже.

Мощность трения при разрушении карагандинского песчаника алмазным диском в зависимости от глубины резания

Глубина резания $H$ , мм (скорость подачи $v_{п} = 3,33 \cdot 10^{-2}$ , м/с) . . . . .	30	50	75	100	125	150	175	200	225	240
Мощность трения $N_{тр}$ , кВт . . . . .	1,4	2,4	3,1	3,8	4,9	6,2	7,1	8,6	10,0	14,0

Мощность трения при разрушении карагандинского песчаника алмазным диском в зависимости от скорости подачи:

Скорость подачи $v_{п}$ , м/с (глубина резания $H = 0,1$ м) $0,5 \cdot 10^{-2}$ $0,83 \cdot 10^{-2}$ $1,67 \cdot 10^{-2}$ $2,5 \cdot 10^{-2}$ $3,33 \cdot 10^{-2}$					
Мощность трения $N_{тр}$ , кВт . . . . .	2,3	2,4	3,0	3,3	3,8

Скорость подачи $v_{п}$ , м/с (глубина резания $H = 0,1$ м) . . . . .	$4,17 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$5,33 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$
Мощность трения $N_{тр}$ , кВт . . . . .	4,0	5,2	7,2	7,2	9,2

По данным стр. 108 построены графические зависимости мощности трения от глубины резания (рис. 59) и от скорости подачи (рис. 60). Как видно, с изменением глубины резания мощность трения  $N_{тр}$  изменяется неравномерно. Эта особенность изменения  $N_{тр}$  характеризуется более быстрым ростом угла наклона кривой к оси абсцисс. Скорость подачи аналогично влияет на мощность трения.

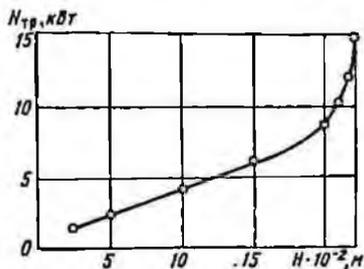


Рис. 59. Зависимость мощности трения от глубины резания при  $v_n = 3,4 \cdot 10^{-2} м/с$

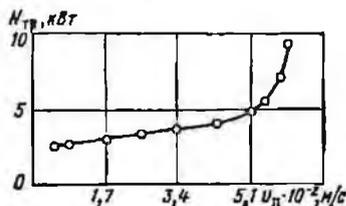


Рис. 60. Зависимость мощности трения от скорости подачи при  $H = 0,1 м$

В этих исследованиях скорость резания оставалась постоянной, поэтому на величину  $N_{тр}$  в соответствии с формулой (65) оказывают влияние изменения площади контакта инструмента с породой  $R\phi b$  и сомножитель  $f_{св}P_{уд}$ . В условиях опыта изменение площади контакта инструмента с породой определялось только глубиной резания. Поэтому при прочих постоянных параметрах мощность трения с увеличением глубины резания должна возрастать по косинусоиде. На рис. 59 такая закономерность изменения  $N_{тр}$  до некоторой степени подтверждается экспериментально в диапазоне глубин резания от 30 до 175 мм. При большой глубине резания эта закономерность имеет качественно отличный характер. Из формулы (65) видно, что нарушение этой закономерности может быть вызвано только влиянием сомножителя  $f_{св}P_{уд}$ . Применительно к условиям эксперимента можно принять коэффициент трения постоянным. Тогда нормальное давление поверхности связки на забой  $P_{уд}$  не остается постоянным с изменением глубины резания. Таким образом, нормальное давление поверхности связки на забой зависит от режима резания и влияет на величину и характер изменения мощности трения. Используя экспериментальные значения мощности трения, можно определить  $P_{уд}$ , как

$$P_{уд} = \frac{1 \cdot 10^{-3} N_{тр}}{R\phi b f_{св} v_p}, \text{ МН/м}^2. \quad (106)$$

При определении  $P_{уд}$  по формуле (106) в зависимости от глубины резания необходимо подставить в формулу значения  $N_{тр}$  из графика на рис. 59, а при определении  $P_{уд}$  в зависимости от скорости подачи значения мощности снимать с графика,

показанного на рис. 60. Предварительно для каждого значения глубины резания следует найти соответствующее ей значение центрального угла из соотношения  $\varphi = \arccos\left(1 - \frac{H}{R}\right)$ . По

расчетным данным построены графические зависимости  $P_{уд}$  от глубины резания и скорости подачи (рис. 61), из которых видно, что нормальное давление не остается постоянным при изменении как глубины резания, так и скорости подачи.

Объясняется это неравномерностью распределения продуктов разрушения по всей площади контакта инструмента с поро-

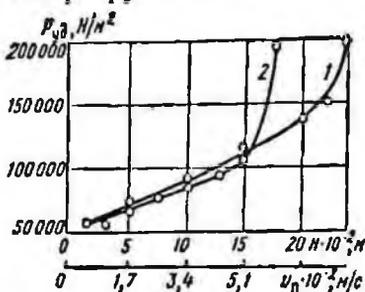


Рис. 61. Зависимости  $P_{уд}$  от глубины резания (1) при скорости подачи  $v_n = 3,4 \cdot 10^{-2}$  м/с и от скорости подачи (2) при  $H = 0,1$  м

родой. В зоне резания имеет место локальное скопление продуктов разрушения, эти скопления возникают перед отдельным алмазным зерном или перед группой зерен. В начальный момент резания, когда некоторый участок рабочей поверхности диска вступает в контакт с породой, продуктов разрушения мало количество и они свободно распределяются в зоне резания, не образуя локальных скоплений. Трение происходит в основном за счет непосредственного воз-

действия неровностей связки о неразрушенный забой. Вероятность такого воздействия для изученных режимов резания незначительна. Поверхность связки вступает в контакт с неразрушенным забоем при условии

$$\frac{v_n}{v_p} = \frac{0,83 \cdot 10^{-2} r}{t - r} \quad (107)$$

Подставляя значение  $t$  из формулы (6), получим

$$v_n = \frac{0,5v_p (1,43 \cdot 10^{-2} R\varphi K_0 - \pi r)}{\pi (R\varphi + r) - 1,43 \cdot 10^{-2} R\varphi K_0}, \text{ м/с.} \quad (108)$$

Для алмазного диска, работающего при скорости резания 60 м/с и глубине резания 100 мм, максимальная скорость подачи, рассчитанная по формуле (108), равна  $167 \cdot 10^{-2}$  м/с. Скорость подачи, при которой проведены исследования, имеет величину в десятки раз меньшую. Поэтому влияние непосредственного контакта поверхности связки с поверхностью забоя на величину силы нормального давления не имеет существенного значения.

По мере перемещения участка рабочей поверхности диска в направлении скоростей резания и подачи продукты разрушения постоянно накапливаются в промежутках между поверхностями связки и забоя. Одновременно с накоплением продуктов

разрушения изменяется и характер их распределения в зоне контакта; появляются зоны локального скопления разрушенной породы, число которых с течением времени увеличивается. В зонах локального скопления продуктов разрушения поверхность связки начинает соприкасаться с разрушенной породой, воздействуя на нее с определенной силой. Величина последней зависит от площади соприкосновения поверхности связки с разрушенной породой и степени ее уплотнения. Площадь соприкосновения и спрессованность продуктов разрушения будут тем больше, чем больше площадь контакта инструмента с породой и чем меньше зазор между поверхностями связки и забоя. Длина дуги контакта увеличивается с ростом глубины резания, а увеличение скорости подачи приводит к уменьшению зазора между поверхностями связки и забоя. Такие представления о распределении продуктов разрушения в зоне резания и особенностях силы нормального давления поверхности связки на забой позволяют объяснить причину изменения  $P_{уд}$  в зависимости от глубины резания и скорости подачи.

С ростом глубины резания и скорости подачи увеличиваются зона локального скопления разрушенной породы и ее спрессованность, что вызывает относительно равномерный рост сил нормального давления поверхности связки на забой. Рост этой силы происходит быстрее, чем увеличение площади контакта инструмента с породой за счет заглабления инструмента. При дальнейшем увеличении глубины резания площадь и число зон локального скопления разрушенной породы быстро возрастают и происходит большее уплотнение продуктов разрушения в этих зонах, что вызывает еще более быстрый рост. Этому процессу (см. рис. 61) соответствует участок кривой 1 при изменении глубины резания от 200 до 240 мм.

Если зазор между поверхностями связки и забоем имеет величину, достаточную для свободного распределения продуктов разрушения в зоне резания, то увеличение скорости подачи до определенного значения не будет сопровождаться ростом  $P_{уд}$ . Дальнейшее увеличение скорости подачи сопровождается уменьшением зазора между поверхностями связи и забоя, что затрудняет свободное распределение продуктов разрушения в зоне резания. Поэтому появляются участки скопления разрушенной породы и ее спрессовка (участок кривой 2 на рис. 61) при изменении скорости подачи от  $0,5 \cdot 10^{-2}$  до  $5,0 \cdot 10^{-2}$  м/с. Когда расстояния между частицами разрушенной породы относительно велики, сила, необходимая для спрессовки продуктов разрушения, возрастает медленно. При определенном уплотнении сила сжатия требуется значительно большая, чтобы дополнительно уменьшить сжимаемый объем разрушенной породы. Именно по этой причине наблюдается быстрый рост  $P_{уд}$  при изменении скорости подачи от  $5,0 \cdot 10^{-2}$  до  $6,0 \cdot 10^{-2}$  м/с.

В процессе резания нормальное давление, возникающее на

поверхности связки, воздействует на продукты разрушения, которые транспортируются из зоны резания. В результате между продуктами разрушения и поверхностями зазора и связки возникает сила трения, для преодоления которой необходима дополнительная мощность. Для оценки влияния мощности трения на процесс разрушения в целом целесообразно пользоваться относительной величиной  $N_{тр}/N_{р.с}$  (%), где  $N_{р.с}$  — суммарная мощность резания. Пользуясь экспериментальными данными, произведен расчет и построены зависимости изменения относительной мощности трения от глубины резания и скорости подачи (рис. 62).

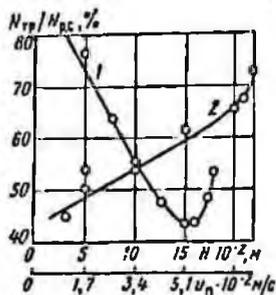


Рис. 62. Зависимости относительной мощности трения от глубины резания (1) при  $v_n = 3,4 \times 10^{-2}$  м/с и от скорости подачи (2) при  $h = 0,1$  м

Анализ этих зависимостей показывает, что при постоянной глубине резания большей скорости подачи соответствует большая толщина стружки, приходящаяся на каждое алмазное зерно, что увеличивает полезную работу разрушения. Но более быстрый рост работы разрушения с увеличением скорости подачи по сравнению с ростом работы трения будет иметь место до тех пор, пока не происходит значительного уплотнения продуктов разрушения в зоне резания. Такое нарушение нормального процесса разрушения наблю-

дается на скоростях подачи больше  $5,0 \cdot 10^{-2}$  м/с, что сопровождается резким увеличением мощности трения. В целях уменьшения мощности трения необходимо увеличивать скорость подачи и уменьшать глубину резания.

Ранее же было доказано, что при выборе режимов работы алмазного дискового инструмента глубину резания целесообразно назначать наибольшую, так как в этом случае снижаются удельные затраты энергии, а выше указывалось, что для уменьшения мощности на трение глубина резания должна быть как можно меньшей. Однако мощность, расходуемая на трение, в области оптимальных и дооптимальных режимов работы инструмента возрастает с увеличением глубины резания медленнее, чем производительность, и в этом смысле наша рекомендация на использование больших глубин оправдана. Но, снижая глубину резания и соответственно повышая скорость подачи, можно существенно повысить секундную производительность, снизить удельные затраты энергии. Вместе с тем при решении технологических задач малая глубина резания оказывается не рациональной из-за увеличения потерь времени на холостые движения исполнительного органа и повышения динамики работы на высоких скоростях подачи.

Применительно к буровым коронкам роль глубины резания играет длина контакта инструмента с породой, которая определяется диаметром коронки. Выбор диаметра коронки, как правило, определяется не величиной затрат энергии, а назначением получаемых шпуров и скважин.

Аналогичные исследования мощности трения при бурении и резании штрипсами показывают, что качественный характер изменения этой величины в зависимости от скоростей бурения и подачи такой же, как и при разрушении породы диском. Однако при бурении мощность, необходимая на преодоление сил трения, значительно превышает мощность, необходимую на разрушение породы алмазными зернами. Так, отношение  $N_{сб}/N_{р.з}$  колеблется от 4 до 12, или, другими словами, затраты энергии на непосредственное разрушение породы не превышают 25% общих затрат энергии.

Используя значения  $N_{тр}$  и формулу (65), можно найти зависимость  $P_{уд}$  от режимных параметров. С этой целью проведено аппроксимирование графических зависимостей, приведенных на рис. 61. Зависимости аппроксимировались уравнением вида  $P_{уд} = \rho e^x$ . Коэффициент  $\rho$  является коэффициентом размерности и имеет численное значение, равное 6300. Показатель степени  $x$  является функцией трех переменных: скорости подачи  $v_{п}$ , скорости резания  $v_{р}$  и величины заглубления диска  $H$  и имеет вид

$$x = 1,8 \cdot 10^6 \left( \frac{v_{п}}{v_{р}} - 8 \cdot 10^{-5} \right)^3 + 2,7 \left( \frac{H}{R} - 0,122 \right) - 4554 \times \\ \times \left( \frac{v_{п}}{v_{р}} - 8 \cdot 10^{-5} \right)^3 \left( \frac{H}{R} - 0,122 \right). \quad (109)$$

Такое аналитическое экспериментальное решение задачи по отысканию расчетной зависимости для мощности, расходуемой на трение, допустимо для конкретных условий.

Взаимосвязь между  $N_{р.з}$  и  $N_{р.с}$  характеризуется специальными коэффициентами мощности трения и силы подачи, которые находятся как отношение общей мощности резания, полученной экспериментально, к мощности резания, полученной расчетом, и аналогично для силы подачи. Если для дискового инструмента коэффициенты мощности трения и силы подачи обозначить через  $K_I$  и  $K_{II}$  соответственно, для буровой коронки  $K'_I$  и  $K'_{II}$  и для штрипсовой пилы  $K''_I$  и  $K''_{II}$ , то расчетные формулы для определения мощности и силы подачи примут вид: для режущих дисков:

$$N_{р.с} = K_I K_{ш} K_{рс} \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \xi P_k R b v_{п}}{K'_d \eta}, \text{ кВт}; \quad (110)$$

$$F_{с.п} = K_{II} K'_{ш} K_{пс} \frac{0,5 \xi P_k R b v_{п}}{v_{р} K'_d}, \text{ Н}; \quad (111)$$

для буровой коронки:

$$N_{\sigma} = K'_1 K'_p \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \xi P_k \pi (R_n^2 - R_{nn}^2) v_n}{K'_d \eta}, \text{ кВт}; \quad (112)$$

$$F_{п.к} = K'_{11} K'_n \frac{0,5 \xi P_k (R_n - R_{nn}) v_n}{n_0 K'_d}, \text{ Н}; \quad (113)$$

для полосовой пилы:

$$N_{p.ш} = K'_1 K'_p \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \xi P_k l_0 b v_n}{K'_d \eta}, \text{ кВт}; \quad (114)$$

$$F_{п.ш} = K'_{11} K'_n \frac{0,5 \xi P_k l_0 b v_n}{v_p K'_d}, \text{ Н}. \quad (115)$$

Формулы для расчета мощности привода и сил подачи содержат величину  $K'_d$ , которая является коэффициентом динамичности работы инструмента. Величина  $K'_d$  в отличие от динамичности работы единичного зерна сравнительно мала из-за большого числа одновременно работающих зерен и в установившемся режиме разрушения пород мелкоалмазным инструментом составляет  $K'_d = 1,1$ . К. п. д. трансмиссии  $\eta$  зависит от конструкции привода, условий работы и других факторов. Приводы камнерезных машин, работающие в стационарных условиях, оснащенные полосовыми пилами и режущими дисками, имеют к. п. д. 0,85—0,9— для трансмиссий движения резания и для трансмиссий движения подачи [6]. К. п. д. трансмиссий для бурильных машин может находиться в таких же пределах [23] или меньших, если учитывать потери на трение в буровом стае. Значение мощности, расходуемой на преодоление трения бурового стаа, зависит от глубины скважины и степени ее искривления [35]. Эта мощность должна суммироваться с мощностью, рассчитанной по формуле (112), а численное значение ее может быть рассчитано по формулам, приведенным в работе [35].

Коэффициенты  $K'_1$ ,  $K'_{11}$ ,  $K'_p$ ,  $K'_{11}$ ,  $K'_r$ ,  $K'_{11}$  устанавливались на основании экспериментальных данных с использованием формул (110)—(115) для ранее принятых пределов изменения режимов разрушения и механических свойств пород. Анализ численных значений коэффициентов мощности трения и сил подачи показал, что они зависят от отношения  $v_n/v_p$  и коэффициента механических свойств пород  $\beta_n$ . Расчетно-экспериментальные значения коэффициентов могут быть представлены графически в зависимости от  $v_n/v_p$ . В связи с тем, что расчетные формулы мощности разрушения не содержат скорости резания, для выявления влияния  $v_p$  на  $K'_1$  построены кривые на рис. 63. Изменение этих кривых в зависимости от

увеличения отношения  $v_n/v_p$  примерно одинаково, а их положение относительно друг друга характеризует влияние скорости резания. Как видно, имеет место отклонение положения кривых 1—3 по оси  $K_I'$  от некоторого среднего положения, причем

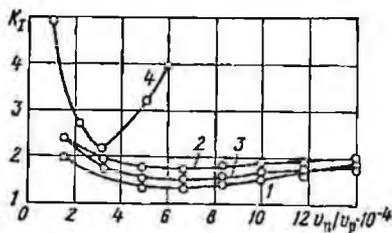
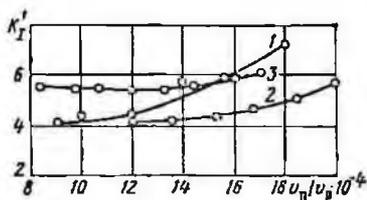


Рис. 63. Зависимости (1—3) коэффициента мощности трения  $K_I'$  при бурении песчаника с  $P_n=1000$  МН/м<sup>2</sup> коронкой с угловой скоростью вращения 168, 210 и 294 рад/с (или 3,3; 4,2 и 5,9 м/с)

Рис. 64. Зависимости коэффициента мощности трения  $K_I$  от отношения  $v_n/v_p$  при резании диском:

1—3 — для скорости резания песчаника ( $P_n=1000$  МН/м<sup>2</sup>) соответственно 24, 40, 32 м/с; 4 — для скорости резания курдайского гранита ( $P_n=2500$  МН/м<sup>2</sup>) 40 м/с (кривым 1—3 соответствует глубина резания 0,250 м, а кривой 4 — 0,05 м)

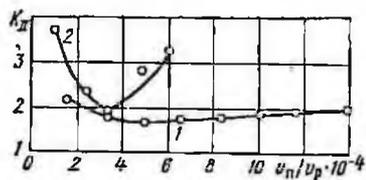
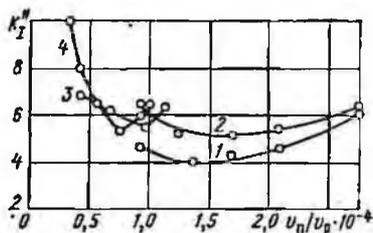


Рис. 65. Зависимости (1—4) коэффициента мощности трения  $K_I''$  от отношения  $v_n/v_p$  при резании полосовой пилой соответственно бодракского известняка ( $P_n=500$  МН/м<sup>2</sup>), коелгинского мрамора ( $P_n=1300$  МН/м<sup>2</sup>), головинского лабрадора ( $P_n=2000$  МН/м<sup>2</sup>) и яшевского гранита ( $P_n=3100$  МН/м<sup>2</sup>)

Рис. 66. Зависимости (1—2) коэффициента силы подачи  $K_I$  от отношения  $v_n/v_p$  при резании диском соответственно песчаника ( $P_n=1000$  МН/м<sup>2</sup>) и курдайского гранита ( $P_n=2500$  МН/м<sup>2</sup>) ( $v_p=40$  м/с, глубина резания соответственно 0,25 и 0,05 м)

величина этих отклонений не превышает 15%. Аналогичные результаты получены для режущего диска, поэтому с достаточной точностью можно принять, что  $K_I$ ,  $K_I'$  и  $K_I''$  не зависят от  $v_p$ .

На рис. 64 и 65 даны зависимости коэффициентов мощности трения  $K_I$  и  $K_I''$  от  $v_n/v_p$  для дискового инструмента и поло-

вой пилы. Изменение кривых в зависимости от  $v_n/v_p$  происходит аналогично (см. рис. 63), что подтверждает сделанный ранее вывод о влиянии скорости резания. Кривая 4 (см. рис. 64) получена при резании курдайского гранита. Характер ее изменения существенно отличается от характера изменения кривых 1—3. Можно предположить, что это влияние обусловлено только механическими свойствами пород. На рис. 65 приведены зависимости  $K'_I$  от  $v_n/v_p$  при распиловке различных горных пород штрипсовой пилой с постоянной скоростью резания. Характер кривых на рис. 65 такой же, как и кривых на рис. 64, различия же в их положении обусловлены влиянием меха-

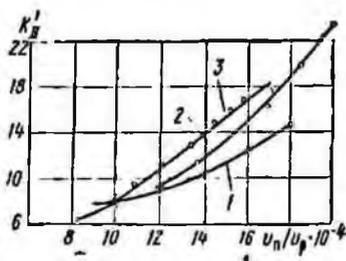


Рис. 67. Зависимости (1—3) коэффициента силы подачи  $K'_{II}$  от отношения  $v_n/v_p$  при бурении песчаника ( $P_n=1000 \text{ МН/м}^2$ ) коронкой с угловой частотой вращения 168, 210 и 294 рад/с (3,3; 4,2 и 5,9 м/с)

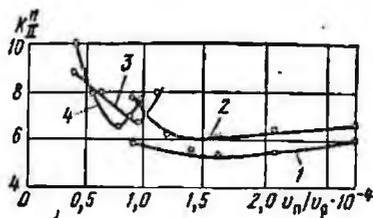


Рис. 68. Зависимости (1—4) коэффициента силы подачи  $K''_{II}$  от отношения  $v_n/v_p$  при резании полосовой пилой соответственно бодракского известняка ( $P_n=500 \text{ МН/м}^2$ ), коелгинского мрамора ( $P_n=1300 \text{ МН/м}^2$ ), голвинского лабрадорита ( $P_n=2000 \text{ МН/м}^2$ ), янцевского гранита ( $P_n=3100 \text{ МН/м}^2$ )

нических свойств породы. Аналогичные результаты получены для коэффициента силы подачи. Зависимости  $K_{II}$ ,  $K'_{II}$ ,  $K''_{II}$  от  $v_n/v_p$  представлены на рис. 66, 67, 68 соответственно. Здесь имеет место определенное различие в величине и характере изменения  $K'_I$ ,  $K'_{II}$  при бурении (рис. 63, 67), тогда как зависимости коэффициента мощности трения и силы подачи при работе дисков и полосовых пил как по величине, так и по характеру почти одинаковы. Это различие объясняется условиями внедрения алмазных зерен в зоне контакта коронки с забоем. Однако различие не является принципиальным, так как тенденция изменения  $K'_{II}$  в сторону меньших значений  $v_n/v_p$  подтверждает закономерности, свойственные изменениям  $K_{II}$  и  $K''_{II}$  в области больших значений  $v_n/v_p$ .

Таким образом, анализ зависимостей, показанных на рис. 63—68, показывает, что коэффициенты мощности трения и силы подачи для всех трех типов инструментов имеют общие зако-

номерности изменения и зависят от толщины срезаемого слоя породы и ее механических свойств. Причем с увеличением контактной прочности интенсивность изменения коэффициентов возрастает, а с увеличением  $v_n/v_p$  коэффициенты сначала снижаются, достигая минимума, а затем возрастают. Так как  $K_I$  и  $K_{II}$  показывают, какая часть мощности разрушения и силы подачи являются результатом взаимодействия поверхности связки с продуктами разрушения и забоем по сравнению с мощностью и силами при разрушении забоя алмазными зернами, несомненно, что уменьшение или увеличение площади соприкосновения на длине контакта вызовет изменение величин  $K_I$  и  $K_{II}$ . Для учета влияния длин промежутков и алмазосодержащих элементов необходимо экспериментальные значения коэффициентов мощности трения и силы подачи умножить на соотношения для дисков и буровых коронок  $1,25 (1 - l_n/l_c + l_n)$ , а для полосовых пил на  $2,5 (1 - l_n/l_n + l_{бр})$ .

Закономерности изменения коэффициентов мощности трения и силы подачи аппроксимируются уравнением типа  $y = ax^2 + bx + c$ , причем  $x = v_n/v_p$  и  $a = a'/\beta_n$ . Методом наименьших квадратов определены значения коэффициентов  $a'$ ,  $b$  и  $c$ . С учетом влияния длин промежутков между алмазосодержащими элементами коэффициенты мощности трения и силы подачи имеют вид:

для режущих дисков:

$$K_I = K_{II} = 1,25 \left( 1 - \frac{l_n}{l_n + l_c} \right) \left[ \frac{1,56 \cdot 10^6}{\beta_n} \left( \frac{v_n}{v_p} \right)^2 - 0,31 \cdot 10^4 \left( \frac{v_n}{v_p} \right) + 3 \right]; \quad (116)$$

для буровых коронок

$$K_I' = \left[ \frac{0,017 \cdot 10^6}{\beta_n} \left( \frac{v_n}{v_p} \right)^2 - 0,35 \cdot 10^4 \left( \frac{v_n}{v_p} \right) + 6,33 \right] 1,25 \left( 1 - \frac{l_n}{l_c + l_n} \right); \quad (117)$$

$$K_{II}' = \left[ \frac{0,1 \cdot 10^6}{\beta_n} \left( \frac{v_n}{v_p} \right)^2 - 1,7 \cdot 10^4 \left( \frac{v_n}{v_p} \right) + 10 \right] 1,25 \left( 1 - \frac{l_n}{l_c + l_n} \right); \quad (118)$$

для полосовых пил

$$K_I'' = \left[ \frac{1,6 \cdot 10^6}{\beta_n} \left( \frac{v_n}{v_p} \right)^2 - 3 \cdot 10^4 \left( \frac{v_n}{v_p} \right) + 7,8 \right] 2,5 \left( 1 - \frac{l_n}{l_{бр} + l_n} \right); \quad (119)$$

$$K_{II}'' = \left[ \frac{1,6 \cdot 10^6}{\beta_n} \left( \frac{v_n}{v_p} \right)^2 - 3 \cdot 10^4 \left( \frac{v_n}{v_p} \right) + \dots \right]$$

$$+ 8,2 \left] 2,5 \left( 1 - \frac{l_n}{l_{6p} + l_n} \right) \right. \quad (120)$$

Здесь значения  $v_n$  и  $v_p$  имеют размерность метр в секунду,  $K_i = K_{11}$ ,  $K_i^*$  мало отличаются от  $K_{11}^*$ , а  $K_i'$  и  $K_{11}'$  существенно отличаются друг от друга. Это объясняется худшими условиями удаления продуктов разрушения из зоны контакта с породой буровой коронки и лучшими при работе режущего диска.

*Пример расчета силовых и энергетических показателей разрушения горных пород мелкоалмазным инструментом.*

1. Исходные данные: а) прорезание в массиве песчаника с контактной прочностью  $P_n = 1000 \text{ МН/м}^2$  и абразивностью  $a = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ кг шели}$  глубиной  $l = 250 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , шириной  $(14 \div 15) 10^{-3} \text{ м}$ ; б) бурение в массиве песчаника с контактной прочностью  $P_n = 800 \text{ МН/м}^2$ , абразивностью  $a = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ кг шпур}$  диаметром  $46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; в) распиловка полосовой пилой блока длиной  $l_c = 2 \text{ м}$  по породе с контактной прочностью  $P_n = 1600 \text{ МН/м}^2$ .

2. а) для нарезания щелей применяем алмазный диск диаметром  $0,8 \text{ м}$  с толщиной режущей части  $b = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; диаметр  $0,8 \text{ м}$  позволит с учетом диаметра ступени прорезать щель глубиной  $250 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; учитывая абразивность песчаника, следует применить связку алмазосодержащей части на основе порошков ВК-10 с пропиткой медью твердостью HRC35; зернистость алмазов А800/630,  $l_c = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $l_n = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; б) заданный диаметр шпуров обеспечивается коронкой 1АГК с наружным диаметром  $46 \cdot 10^{-3}$  и внутренним  $32 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , для указанных механических и абразивных свойств пород применяем связку на основе порошков KB-10 с пропиткой медью твердостью HRC30; зернистость алмазов А1000/800,  $l_c = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $l_n = 6 \cdot 10^{-3}$ ; в) для распиловки блока породы применим штрипсовую пилу с толщиной рабочей части  $b = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $l_{6p} = 35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $l_n = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; зернистость алмазов А630/500, твердость связки HRC25.

Рациональная концентрация рассчитывается по уравнению (99). В этом уравнении радиусы зерна равны для режущего диска —  $0,4 \cdot 10^{-3}$ , для буровой коронки —  $0,5 \cdot 10^{-3}$ , для полосовой пилы —  $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Коэффициент влияния прочности пород  $\beta_n$  рассчитывается по (100). Для дискового инструмента  $\beta_n = 0,8$ , для буровой коронки  $\beta_n = 0,9$ , для полосовой пилы  $\beta_n = 0,55$ . Тогда рациональная массовая концентрация для диска  $K = 0,36 \text{ кг/м}^3$ , для буровой коронки  $K = 0,38 \text{ кг/м}^3$ , для штрипсового инструмента  $K = 0,3 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует объемной концентрации 8, 10 и 6,5% соответственно. Принимаем для диска и коронки  $K_0 = 12,5\%$  и для штрипсовой пилы  $K_0 = 6,25\%$ .

3. По результатам исследований скорость резания для дисков следует выбирать в пределах 50—55 м/с, если  $P_n < 1200 \text{ МН/м}^2$ , при диаметре инструмента  $0,8 \text{ м}$  частота вращения привода равна 149—154 рад/с, для коронки диаметром  $46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  скорость резания примем равную 5 м/с, что соответствует частоте вращения бурового става 251 рад/с; для определения рациональных скоростей подачи воспользуемся формулами (101) — (104):

а) для дискового инструмента коэффициент разрыхления  $C_p = 1,52$ , радиус диска  $R = 0,4 \text{ м}$ ; так как  $H < R$ , то

$$\varphi = \arccos \left( \frac{R - H}{R} \right) = \arccos \left( \frac{0,4 - 0,25}{0,4} \right) = 1,19 \text{ рад.}$$

$$v_n = \frac{r v_p \beta_n}{C_p R \varphi} (0,78 - 0,78 \cdot 10^{-3} K_0) =$$

$$= \frac{0,0004 \cdot 50 \cdot 0,8}{1,52 \cdot 0,4 \cdot 1,19} (0,78 - 0,78 \cdot 10^{-3} \cdot 6,25) = 0,018 \text{ м/с;}$$

б) для буровой коронки с наружным радиусом 0,023 м и внутренним радиусом 0,016 м ( $C_p=1,52$ ) имеем

$$v_n = \frac{rv_p \beta_n}{C_p \pi (R_n + R_{вн})} (0,78 - 0,78 \cdot 10^{-3} K_0) =$$

$$= \frac{0,0005 \cdot 5 \cdot 0,9}{1,52 \cdot 3,14 (0,023 + 0,016)} (0,78 - 0,78 \cdot 10^{-3} \cdot 12,5) = 0,01 \text{ м/с.}$$

Разделим полученное значение  $v_n$  на коэффициент 1,6, характеризующий неравномерность распределения продуктов разрушения в зоне контакта инструмента с породой, тогда окончательно имеем  $v_n = 6 \cdot 10^{-3}$  м/с;

в) для полосовой пилы при  $l_x = 0,25$  м,  $v_p = 0,5$  м/с,  $C_p = 2$ ,

$$\left(1 - \frac{l_n}{l_{6p} + l_n}\right) = 0,4$$

имеем

$$v_n = \frac{2r \beta_n v_p \left(1 - \frac{l_n}{l_{6p} + l_n}\right)}{l_x C_p} (0,3 - 0,71 \cdot 10^{-3} K_0) =$$

$$= \frac{2 \cdot 0,0003 \cdot 0,55 \cdot 0,4}{0,25 \cdot 2} (0,3 - 0,71 \cdot 10^{-3} \cdot 6,25) = 0,00009 \text{ м/с.}$$

4. Выполним расчет мощности на разрушение, воспользовавшись формулами (110) для дискового инструмента, (112) для буровой коронки и (114) для полосовой пилы.

Применительно к дисковой пиле  $\xi = 0,47$ ,  $K_d' = 1,1$ ,  $\eta = 0,85$ ,  $K_p = K_1 + f_{\tau p} K_2$ ;  $K_1$  и  $K_2$  определяются по формулам соответственно (56) и (57);  $K_p$  можно найти по табл. 7, если режим и характеристика инструмента соответствуют табличным, его значение в нашем случае равно 0,48; коэффициент  $K_1$  определяется по формуле (116)

$$K_1 = 1,25 \left(1 - \frac{l_n}{l_c + l_n}\right) \left[ \frac{1,56 \cdot 10^6}{\beta_n} \left(\frac{v_n}{v_p}\right)^2 - 0,31 \cdot 10^4 \left(\frac{v_n}{v_p}\right) + 3 \right] =$$

$$= 1,25 \left(1 - \frac{0,001}{0,05}\right) \left[ \frac{1,56 \cdot 10^6}{0,8} \left(\frac{0,018}{50}\right)^2 - 0,31 \cdot 10^4 \left(\frac{0,018}{50}\right) + 3 \right] = 2,11.$$

Подставляя в формулу мощности численные значения входящих величин и учитывая, что  $K_{\omega} = 0,85$ , получим

$$N_{p.c} = 2,11 \cdot 0,85 \cdot 0,48 \frac{0,47 \cdot 0,5 \cdot 100 \cdot 10^4 \cdot 0,4 \cdot 0,014 \cdot 0,018}{1,1 \cdot 0,85} = 23 \text{ кВт.}$$

Применительно к буровой коронке коэффициент режимов бурения рассчитывается по формуле (96) с учетом  $n_6 = 40$  об/с;  $f_{\tau p} = 0,35$ ,  $K_p' = 0,78$ . Коэффициент  $K_1'$  рассчитывается по формуле (117) и для наших условий равен

$$K_1' = 1,25 \left(1 - \frac{l_n}{l_c + l_n}\right) \left[ \frac{0,017 \cdot 10^8}{\beta_n} \left(\frac{v_n}{v_p}\right)^2 - 0,35 \cdot 10^4 \left(\frac{v_n}{v_p}\right) + 6,33 \right] =$$

$$= 1,25 \left(1 - \frac{0,006}{0,031}\right) \left[ \frac{0,017 \cdot 10^8}{0,9} \left(\frac{0,006}{5}\right)^2 - 0,35 \cdot 10^4 \left(\frac{0,006}{5}\right) + 6,33 \right] = 4,9.$$

Тогда мощность бурения по формуле (112)

$$N_6 = 4,9 \cdot 0,78 \frac{0,47 \cdot 0,5 \cdot 80 \cdot 10^4 \cdot 3,14 \cdot 2,75 \cdot 10^{-4} \cdot 0,006}{1,1 \cdot 0,85} = 4 \text{ кВт.}$$

Для расплюсвки блока полосовой пилой коэффициент режимов работы определяется по формуле (98)

$$K_p^* = \left[ \frac{\pi 70 v_{II}}{v_p K_a \left( 1 - \frac{l_n}{l_{op} + l_n} \right)} \right]^{1/4} + f_{тр} \left\{ 2 - \left[ \frac{70\pi}{v_p K_a} \cdot \frac{v_n}{\left( 1 - \frac{l_n}{l_{op} + l_n} \right)} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} =$$

$$= \left[ \frac{70\pi v_n}{0,5 \cdot 6,25 \cdot 0,4} \right]^{1/4} + 0,35 \left\{ 2 - \left[ \frac{70 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{-5}}{0,5 \cdot 6,25 \cdot 0,4} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} = 0,92;$$

коэффициент мощности трения определяется по формуле (119)

$$K_f^* = 2,5 \left( 1 - \frac{l_n}{l_{op} + l_n} \right) \left[ \frac{0,8 \cdot 10^8}{\beta_n} \left( \frac{v_n}{v_p} \right)^2 - 3,0 \cdot 10^4 \left( \frac{v_n}{v_p} \right) + 7,8 \right] =$$

$$= 2,5 \cdot 0,4 \left[ \frac{0,8 \cdot 10^8}{0,55} \left( \frac{9 \cdot 10^{-5}}{0,5} \right)^2 - 3,0 \cdot 10^4 \left( \frac{9 \cdot 10^{-5}}{0,5} \right) + 7,8 \right] = 7,1.$$

Подставляя численные значения величин, входящих в формулу мощности (114), получим

$$N_{p,ш} = K_f^* K_p^* \frac{0,5 \cdot 10^{-5} \xi P_k l_{op} b v_{II}}{K_{дп}} = 7,1 \cdot 0,92 \frac{0,47 \cdot 0,5 \cdot 160 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 0,007 \cdot 9 \cdot 10^{-5}}{1,1 \cdot 0,85} =$$

$$= 2,9 \text{ кВт}$$

5. Расчеты сил подачи на резания диском, бурение коронкой и резание полосовой пилой выполним с помощью формул (111), (113) и (115) соответственно:

$$F_{сп} = K_{II} K_{п.с} \frac{\xi P_k R b v_{II} K_{ш}^*}{2 K_{дп}^* v_p},$$

где  $K_{п.с} = (K_n^2 + K_{от}^2)^{1/2}$ , для заданных условий  $K_n$  и  $K_{от}$  можно определить по табл. 9 и 10, из которых следует, что  $K_n = 0,89$  и  $K_{от} = -0,27$ , тогда  $K_{п.с} = 0,93$ .

Коэффициент силы подачи  $K_f$  определяется по формуле (116). Величина его равна  $K_{II}$ , т. е.  $K_f = K_{II} = 2,11$ ,  $K_{ш}^* = 1,2$ ; остальные значения параметров, входящих в формулу для расчета силы подачи такие же, как и при расчете мощности. Отсюда.

$$F_{п.с} = 2,11 \cdot 0,93 \cdot 1,2 \frac{0,47 \cdot 1000 \cdot 10^8 \cdot 0,4 \cdot 0,014 \cdot 0,018}{2 \cdot 1,1 \cdot 50} = 1080 \text{ Н.}$$

Для бурения коронкой

$$K_n^* = \left[ 2 - \sqrt{\frac{70 v_{II}}{(R_n + R_{вн}) K_{отб}}} \right]^{1/2} = \left[ 2 - \sqrt{\frac{70 \cdot 0,0006}{(0,023 + 0,016)}} \right]^{1/2} = 1,35.$$

$K_{II}^*$  рассчитывается по формуле (117), подставив значения входящих величин получим  $K_{II}^* = 12$ , остальные величины такие же, как и в формуле (112). Подставляя их численные значения, определим силы подачи при бурении по формуле (113)

$$F_{п.к} = K_{II}^* K_n^* \xi P_k \frac{(R_n - R_{вн}) v_{II}}{2 n_G K_G^*} = 12 \cdot 1,35 \cdot 0,47 \cdot 80 \cdot 10^7 \times$$

$$\times \frac{(0,023 - 0,016) \cdot 0,006}{2 \cdot 40 \cdot 1,1} = 2950 \text{ Н.}$$

При резании штрипсовой пилой сила подачи определяется как

$$F_{п.ш} = K_{II}^* K_n^* \frac{\xi P_K l_{бв} v_n}{2v_p K_d}$$

Коэффициент силы подачи вычисляется по формуле (120):

$$K_{II}^* = \left[ \frac{0,8 \cdot 10^8}{\beta_n} \left( \frac{v_n}{v_p} \right)^2 - 3,0 \cdot 10^4 \left( \frac{v_n}{v_p} \right) + 8,2 \right] 2,5 \times \\ \times \left( 1 - \frac{l_n}{l_{бп} + l_n} \right) = \left[ \frac{0,8 \cdot 10^8}{0,55} \left( \frac{9 \cdot 10^{-5}}{0,6} \right)^2 - 3,0 \cdot 10^4 \left( \frac{9 \cdot 10^{-5}}{0,5} \right) + 8,2 \right] \times \\ \times 2,5 \cdot 0,4 = 7,5.$$

Остальные параметры такие же, как при расчете по формуле (114). Тогда сила подачи по формуле (115)

$$F_{п.ш} = 7,5 \cdot 1,37 \frac{0,47 \cdot 160 \cdot 10^7 \cdot 2 \cdot 0,007 \cdot 0,00009}{2 \cdot 0,5 \cdot 1,1} = 22 \ 300 \text{ Н.}$$

Численный пример, приведенный выше, показывает сравнительную простоту вычислений, логичности в последовательности выбора параметров инструмента и режимов его работы и расчета показателей разрушения горных пород. Полученные по приведенной методике результаты могут быть использованы не только при проектировании породоразрушающих и бурильных машин, но и позволят обоснованно подобрать существующее оборудование и инструмент, если известны механические свойства пород и параметры разрушения.

## АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ В ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНАХ ГОРНЫХ МАШИН

### § 1. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Анализ схем разрушения забоя, проведенный в гл. 1, показывает, что применение алмазного инструмента целесообразно в комбинированных схемах разрушения. В соответствии с этими схемами ниже рассматриваются конструкции исполнительных органов типа «Алмаз» и особенности их работы. Эти исполнительные органы получили наименование «Алмаз» и имеют ряд модификаций [19].

Исполнительный орган породопроходческого комбайна «Алмаз-1» изготовлен с привязкой к базовому проходческому комбайну ПК-3М и ПК-9Р. Принцип его работы заключается в комбинированном разрушении забоя путем прорезания алмазным диском щели в массиве параллельно поверхности забоя с последующим отделением междущелевых целников породы специальным гидроотрывником. Объем щели составляет 20—25% всего объема разрушаемой породы.

Исполнительный орган (рис. 69) представляет собой стрелу, установленную на платформе, с алмазным диском 1 и тарельчатым отрывником 2. Ее поворот вправо-влево и перемещение вверх-вниз осуществляются теми же домкратами, что и на комбайне ПК-3М. Передача крутящего момента от электродвигателя 6 к исполнительному органу осуществляется с помощью гидромуфты 5 типа ТМ-32, различным заполнением которой рабочей жидкостью изменяется частота вращения турбинного колеса, т. е. скорость резания. Турбинное колесо через промежуточный вал и зубчатую муфту 4 связано с валом 3 режущего диска. Корпус режущего диска выполнен заодно со ступицей, которая насаживается на вал до упора на двух шпонках и крепится на нем фасонной гайкой. Последняя спрятана в углублении диска и в процессе разрушения забоя не мешает перемещению диска.

Гидроцилиндр 5 отрывника 2 (рис. 70) крепится к торцовой части корпуса стрелы, в котором размещен вал 3 режущего диска 1. На наружной поверхности трубы отрывника укреплен поршень 4. Внутренней поверхностью своей трубы отрывник опирается на вал режущего диска, по которому он скользит при возвратно-поступательном движении.

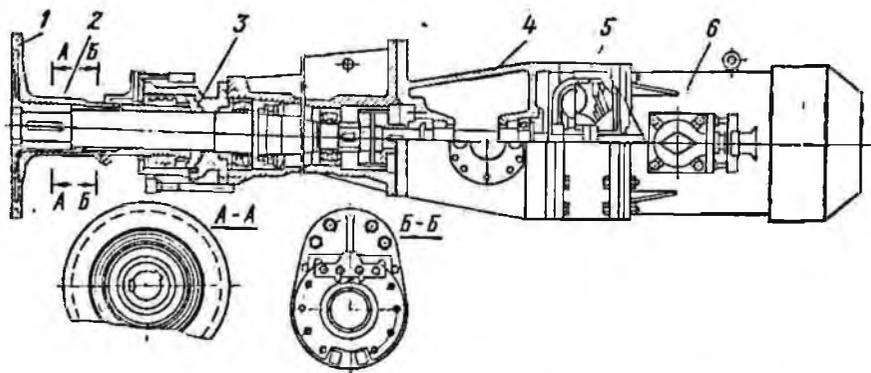


Рис. 69. Схема исполнительного органа комбайна «Алмаз-1»

В процессе резания отрывник находится в крайнем левом положении и полностью прячется в потай алмазного диска. При подаче рабочей жидкости в левую полость гидроцилиндра поршень, увлекая за собой жестко связанный с ним отрывник, перемещается вправо (рабочий ход), вытесняя масло из правой полости на слив. Происходит отрыв надщелевого целлика *b* породы. По мере вращения золотника маслораспределителя правая полость гидроцилиндра сообщается с напорной магистралью, а левая — со сливом, и отрывник возвращается в первоначальное положение. В дальнейшем цикл повторяется. Частота срабатывания отрывника и величина его хода регулируются частотой вращения золотника маслораспределителя в зависимости от скорости подачи исполнительного органа и глубины отрыва. Регулирование числа оборотов гидродвигателя золотника, а следовательно, и частоты срабатывания отрывника производится дросселем, включенным параллельно в напорную магистраль.

Необходимое число срабатываний отрывника  $m_{ц}$  тем больше, чем больше скорость подачи  $v_{п}$  и меньше глубина отрыва  $h_{от}$ , т. е.

$$m_{ц} = \frac{l}{l_{ц}}$$

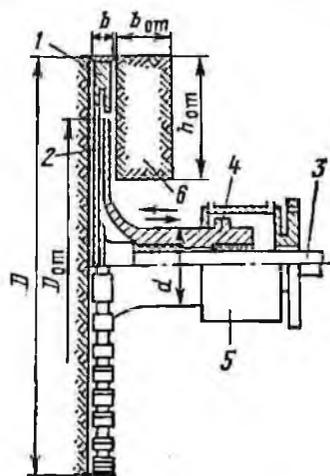


Рис. 70. Схема рабочего гидроцилиндра отрывника

где  $t_{ц} = \frac{h_{от}}{v_n}$  — время одного цикла срабатывания отрывника.

Глубина отрыва зависит от диаметра режущего диска и диаметра ступицы отрывника и должна удовлетворять неравенству

$$h_{от} \leq \frac{(D-d)}{2}.$$

Для обеспечения нормальной работы алмазных сегментов и пылеподавления в полотне диска из кольцевой расточки просверлены сквозные радиальные отверстия, выходящие на режущую поверхность диска, через которые под действием центробежной силы подается вода непосредственно в зону резания.

В последнее время в связи с ростом производительности, а следовательно, и энерговооруженности горных машин условия их работы значительно усложнились, увеличились нагрузки на их исполнительные органы. В результате повысились требования к надежности и долговечности как всей машины в целом, так и отдельных ее узлов и особенно исполнительных органов. Поэтому при конструировании машины уже недостаточно использовать обычные статические методы расчета, не позволяющие учитывать увеличение усилий за счет динамического приложения нагрузок в переходных режимах работы исполнительного органа.

Динамический расчет исполнительного органа комбайна «Алмаз-1» для различных переходных процессов [26] показывает, что наличие в исполнительном органе, армированном алмазными сегментами, гидромуфты улучшает пусковые характеристики привода: стравливание с места ведомой части начинается через 0,2 с после включения приводного электродвигателя, процесс запуска длится 1,65 с. Свойство гидромуфты как демпфера крутильных колебаний в исполнительном органе породопроходческого комбайна проявляются тем лучше, чем выше частота вынужденных колебаний и чем больше масса ведущих частей, воспринимающих колебания через гидropередачу. Частота собственных колебаний колеса гидромуфты  $\nu = 980$  рад/с наиболее близка по величине к частоте изменения внешних сил на режущем диске  $P_c = 850$  рад/с. Однако возможность резонанса этих частот исключается, так как их несовпадение составляет более 15% и увеличивается за счет скольжения гидромуфты при возрастании нагрузки на алмазном диске.

Для проведения испытаний исполнительного органа на шахте № 1—2 «Тентекская-Вертикальная» треста Долинскшахтопроходка был подготовлен забой. Горизонтальная выработка сечением 8,5 м<sup>2</sup> вчерне проводилась по песчанику с коэффициентом крепости 7—8 по шкале проф. М. М. Протодяконова (контактная прочность 960 МН/м<sup>2</sup>) и абразивностью 30—35 мг.

Песчаник серый, среднезернистый, плотный. В нижней части забоя имелась некоторая трещиноватость и наблюдались узкие прослойки растительного детрита. Разрушение песчаника осуществлялось последовательным перемещением исполнительного органа справа налево, вверх, слева направо, вверх и т. д по всему сечению выработки.

Эксперименты по разрушению песчаника исполнительным органом комбайна «Алмаз-1» проводились при полном заполнении гидромолоты рабочей жидкостью, что обеспечивало скорость резания, равную 45 м/с, причем скорость подачи и глубина

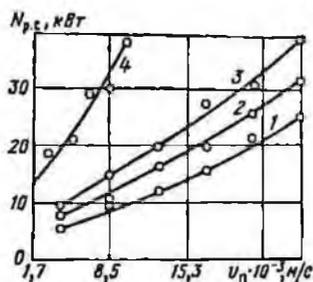


Рис. 71. Зависимости (1—4) мощности, потребляемой на разрушение, от скорости подачи исполнительного органа комбайна «Алмаз-1» при глубине резания соответственно 0,1; 0,15; 0,2 и 0,63 м

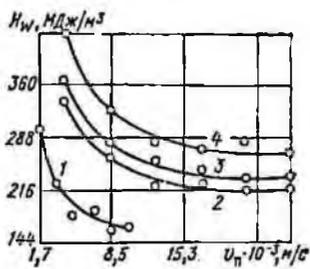


Рис. 72. Зависимости (1—4) удельных затрат энергии на разрушение забоя от скорости подачи исполнительного органа комбайна «Алмаз-1» при глубине резания соответственно 0,63; 0,2; 0,15 и 0,1 м

резания в процессе эксперимента изменялись соответственно от  $1,65 \cdot 10^{-3}$  до  $25 \cdot 10^{-3}$  м/с и от 0,1 до 0,63 м. При этом изменение мощности, потребляемой на разрушение, с ростом скорости подачи аналогично ранее представленным зависимостям для диска АОК, т. е. с ростом скорости подачи мощность возрастает практически линейно (рис. 71). Большой глубине резания соответствует большая по величине потребляемая мощность. Максимально возможная скорость подачи для глубины резания 0,2 м составила  $25 \cdot 10^{-3}$  м/с, а для глубины, равной диаметру диска (0,63 м) —  $10 \cdot 10^{-3}$  м/с, при этом мощность, необходимая на разрушение, в обоих случаях достигала 38 кВт.

Если принимать в расчет небольшую разницу в скоростях резания (для диска АОК—40 м/с, а для диска комбайна «Алмаз-1» — 45 м/с), то можно сделать вывод, что с ростом ширины режущего инструмента мощность, необходимая на разрушение, увеличивается медленнее, чем ширина диска. Так, увеличение ширины диска от 6,5 до 34 мм, т. е. в 5,2 раза, приводит к росту мощности при скорости подачи  $v_p = 25 \cdot 10^{-3}$  м/с от 10 до 38 кВт, или в 3,8 раза для глубины 200 мм, а для глубины 100 мм — в 4,2 раза.

Уменьшение доли бокового трения в общем балансе потребляемой мощности сопровождается снижением удельных затрат энергии на разрушение, чему также способствует увеличение расстояния между алмазными сегментами по линии резания, так как это увеличивает среднее значение толщины срезаемой алмазными зернами стружки и облегчает вынос продуктов разрушения из зоны резания. Так, для АОК при глубине резания 200 мм и скорости подачи  $25 \cdot 10^{-3}$  м/с удельные затраты энергии на разрушение составляют около 252 МДж/м<sup>3</sup>, а для диска комбайна «Алмаз-1» при тех же режимах резания величина удельных затрат энергии равна 216 МДж/м<sup>3</sup> (рис. 72).

Из рис. 72 видно, что с увеличением скорости подачи от  $1,65 \cdot 10^{-3}$  до  $25 \cdot 10^{-3}$  м/с удельные затраты энергии на разрушение снижаются, причем большей глубине резания соответствуют меньшие удельные затраты энергии.

Наименьшие удельные затраты энергии при разрушении песчаника диском комбайна «Алмаз-1» — 166 МДж/м<sup>3</sup> получены при резании на глубину, равную диаметру диска, со скоростью подачи  $10 \cdot 10^{-3}$  м/с. Дальнейшее увеличение скорости подачи исполнительного органа оказалось невозможным из-за опрокидывания электродвигателя. Судя по характеру изменения кривой 1 (см. рис. 72), удельные затраты энергии с дальнейшим увеличением скорости подачи стабилизируются, во всяком случае, снижение их будет незначительным.

Таким образом, влияние режимов резания на энергетические показатели процесса разрушения песчаника алмазными дисками типа АОК и комбайна «Алмаз-1» аналогичны. Удельные затраты энергии при разрушении песчаника отрывом составили в среднем 1,8 МДж/м<sup>3</sup>, а удельные затраты энергии на комбинированное разрушение карагандинского песчаника оказались равными 35 МДж/м<sup>3</sup>.

Усилие подачи, действующее на алмазный режущий диск при перемещении исполнительного органа в процессе разрушения забоя, зависит от скорости подачи и глубины резания (рис. 73).

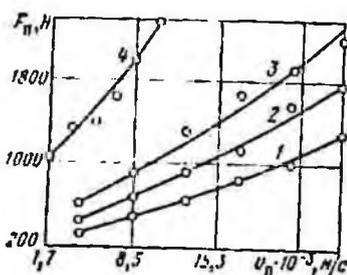


Рис. 73. Зависимости (1—4) усилия подачи для разрушения забоя от скорости подачи исполнительного органа комбайна «Алмаз-1» при глубине резания соответственно 0,1; 0,15; 0,5 и 0,63 м

Как видно из рис. 73 с увеличением скорости подачи усилие подачи возрастает, причем во всем диапазоне изменения скорости подачи большей глубине резания соответствует большее по величине усилие подачи. Максимальное по величине уси-

лие подачи получено при резании со скоростью  $10 \cdot 10^{-3}$  м/с для глубины резания 630 мм, которое составило 2330 Н.

В процессе испытаний одновременно с резанием производился отрыв целиков породы от массива с помощью гидроотрывника. Разрушение горных пород отрывом значительно улучшает энергетические показатели при проведении выработок и снижает запыленность воздуха по сравнению с другими способами механического разрушения, так как при этом выход мелких классов значительно уменьшается [27, 36]. Средний размер в поперечнике кусков породы, полученных в результате разрушения надщелевых целиков отрывником исполнительного органа комбайна «Алмаз-1», составляет 300—350 мм.

В процессе шахтных исследований было испытано несколько типов режущих алмазных дисков. Диск первоначальной конструкции имел сегменты от серийно выпускаемых алмазных дисков типа АОК. Небольшая площадь сегментов в месте их пайки к оправкам при сравнительно большой высоте явилась причиной их малой сопротивляемости отрыву от оправок при поперечном смещении диска в процессе отрыва породных целиков. Из-за большой длины режущих элементов при малой их ширине имели место случаи раскалывания алмазных сегментов, чему также способствовало недостаточно жесткое крепление самих оправок.

В связи с этим для исполнительного органа комбайна «Алмаз-1» были разработаны два алмазных диска с широкими алмазными сегментами и специальное крепление оправок к ободу диска. В отличие от диска первой конструкции, имевшего шесть линий резания, новые диски имели две линии резания, причем сегменты напаялись попарно на двадцати оправках, которые затем приваривались к периферийной части полотна диска.

Алмазные сегменты за счет увеличенной площади в месте их пайки прочно удерживались на оправках, поэтому в процессе испытаний не было случаев поломки сегментов и отрыва их от оправок. С целью предотвращения контакта корпуса диска со стенками прорезаемой щели сегменты припаяны к оправке так, чтобы они выступали над корпусом диска на 1—1,5 мм. Образующийся в процессе разрушения песчаника целичок в средней части рабочей поверхности способствовал уменьшению вибрации алмазного диска во время его работы.

Способ удаления целичка путем его скалывания специальными твердосплавными пластинками — скальвателями (рис. 74, а), расположенными в четырех диаметрально противоположных местах по периферии диска, не вполне оправдал себя, так как при больших скоростях резания эти пластинки из-за малой площади контакта быстро изнашивались, работая в основном на истирание. При этом наблюдался повышенный расход энергии, потребляемой рабочим органом.

В дальнейшем для разрушения целочки породы в средней части рабочей поверхности использовались дополнительные тонкие алмазные сегменты, которые закреплялись в промежутках между основными (рис. 74, б). Диск с дополнительными алмазными сегментами обнаруживал заметные признаки изно-

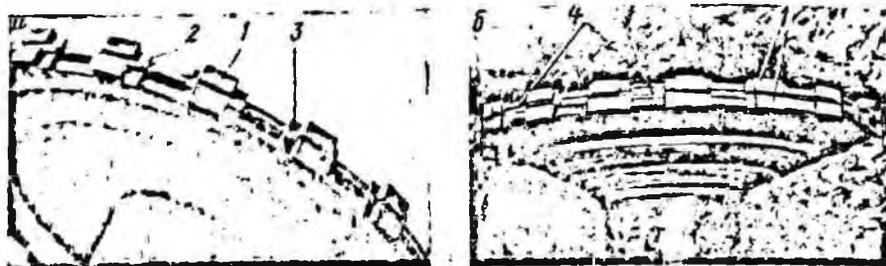


Рис. 74. Экспериментальные образцы алмазных режущих дисков комбайна «Алмаз-1»:

1 — основные алмазные сегменты; 2 — твердосплавные скальватели; 3 — оправка алмазных сегментов; 4 — дополнительные алмазные сегменты

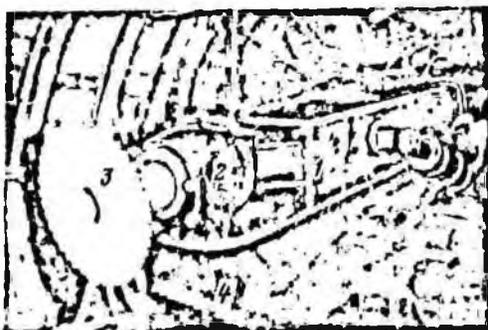


Рис. 75. Экспериментальный образец проходческого комбайна «Алмаз-III»:

1 — стрела исполнительного органа; 2 — гидроцилиндр отрывника; 3 — алмазный режущий диск; 4 — погрузочный орган

са через 200 м<sup>2</sup> площади реза, а после 300 м<sup>2</sup> был изношен на 40% по периферии и на 80% по боковым поверхностям основных алмазных сегментов.

Комбайн «Алмаз-III» (рис. 75), сохранив принципиальную конструктивную схему своего предшественника, является более совершенной машиной. Мощность его приводного двигателя увеличена до 88 кВт (затем до 115 кВт) против 32 кВт на комбайне «Алмаз-1». Вместо коль-

цевого скребкового грузчика (ПК-3М) использован погрузочный орган с загребующими лапами (ПК-9р).

Существенно изменена и конструкция алмазного режущего диска (рис. 76). Диаметр последнего стал равен 820 мм, число сегментов в двух линиях резания возросло до 80. Полотно диска выполнено сферическим с радиусом, равным вылету исполнительного органа. Режущая поверхность диска — комбинированная с центральным кольцевым скальвателем между двумя

линиями резания — дала возможность увеличить полезную ширину диска по сегментам и, следовательно, толщину и прочность тарелки отрывника без увеличения площади контакта алмазных сегментов с массивом при формировании щели. На рис. 76, б показан исполнительный орган комбайна «Алмаз-1И» в процессе обработки забоя перед разрушением надщелевого целика. Из рисунка видно, что алмазный диск, прорезав в массиве щель, образовал надщелевой целик породы, который будет отделен при осевом перемещении тарелки отрывника.

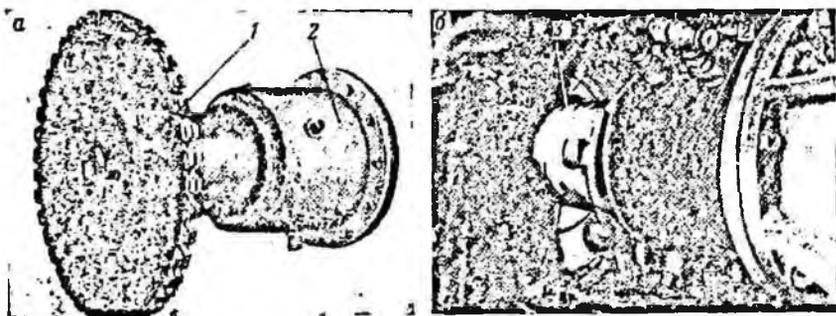


Рис. 76. Исполнительный орган комбайна «Алмаз-1И»:

а — вид со стороны забоя; б — вид со стороны отрывника; 1 — сферический диск; 2 — гидродоцилиндр отрывника; 3 — тарелка отрывника

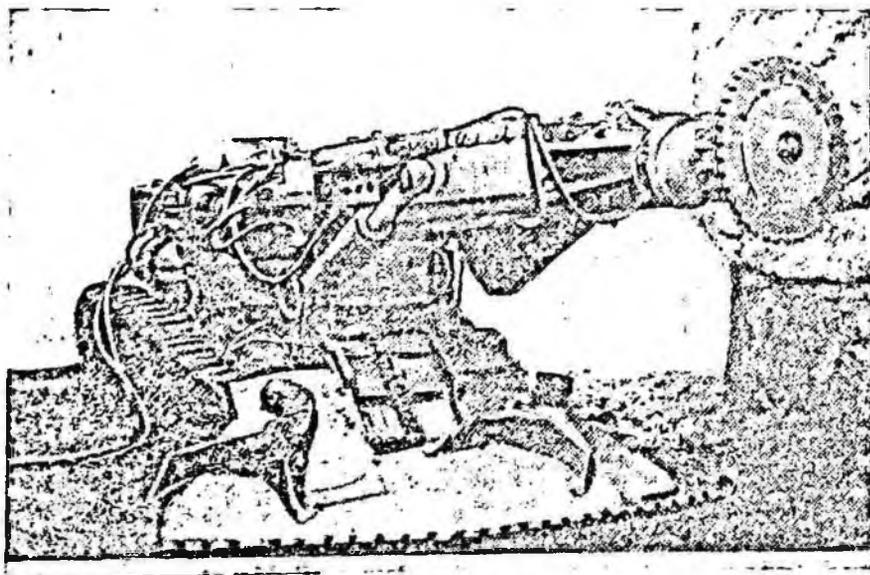


Рис. 77. Комбайн «Карагандинец-ПРА»

С целью расширения области применения проходческого комбайна такого типа был предложен на базе того же комбайна ПК-9Р универсальный вариант комбайна с исполнительным органом, который оснащался сменным резово-алмазным диском. Главный привод комбайна «Карагандинец-ПРА» (рис. 77) снабжен двухскоростным редуктором, обеспечивающим скорости резания, необходимые для резового и алмазного инструментов. Замена инструмента производилась по мере необходимости путем смены резового обода диска на алмазный и наоборот. Для быстрого осуществления этой операции обод на корпусе диска закреплялся с помощью клиповых соединений. В процессе стендовых испытаний резовый диск эффективно разрушал породу с коэффициентом крепости до 6 по шкале проф. М. М. Протодяконова (песчаник, аргиллит), а алмазный — до 18 (серпентинит, плагиоклаз, диорит).

Одной из важнейших операций при разрушении забоя комбайном с алмазно-отрывным исполнительным органом является первоначальное врезание (зарубка) последнего в массив. Эта операция имеет свои особенности, обусловленные кинематикой перемещения исполнительного органа — режущего диска вдоль забоя и его расположением относительно последнего. Исполнительный орган разрушает забой параллельными слоями, и первоначальное врезание диска в массив связано с определенными трудностями. Исследования в этой области привели к разработке ряда способов и механизмов для зарубки диска в массив.

Ранее (см. рис. 13, а) была показана схема зарубки дискового исполнительного органа с помощью предварительно созданной опережающей скважины или ниши на глубину, равную толщине нескольких слоев, размеры которой позволяют заводить в нишу режущий диск (путь исполнительного органа при обработке забоя показан стрелками). Недостатком такого способа зарубки является необходимость применения специального забурника для образования опережающей скважины. Другая схема зарубки (рис. 78, а) предназначена для работы агрегата, состоящего из двух комбайнов с дисковыми исполнительными органами отрывного действия [26]. Врезание диска в массив достигается наличием уступа, образуемого при работе одновременно двух комбайнов в одном забое или одного комбайна, последовательно смещаемого относительно оси выработки. Эта схема зарубки была осуществлена при проведении шахтных испытаний комбайна «Алмаз-ИИ». Недостатком схемы, как показали испытания, являются потери времени на маневровые операции. Этот недостаток устранен в схеме с применением комбайна «Карагандинец-ПС», зарубка которого осуществляется при переломе стрелы поворотом в дополнительном шарнире на рукоятке (рис. 78, б). После обработки забоя по малому радиусу стрела выпрямляется и исполнитель-

ный орган описывает дугу по большому радиусу, обрабатывая забой на глубину, равную шагу одного цикла.

Способ зарубки с образованием центрального уступа на забое (рис. 78, в) путем обработки его исполнительным органом из двух положений слева и справа от оси выработки, совпадающей с осью комбайна, осуществлен с помощью специального механизма смещения.

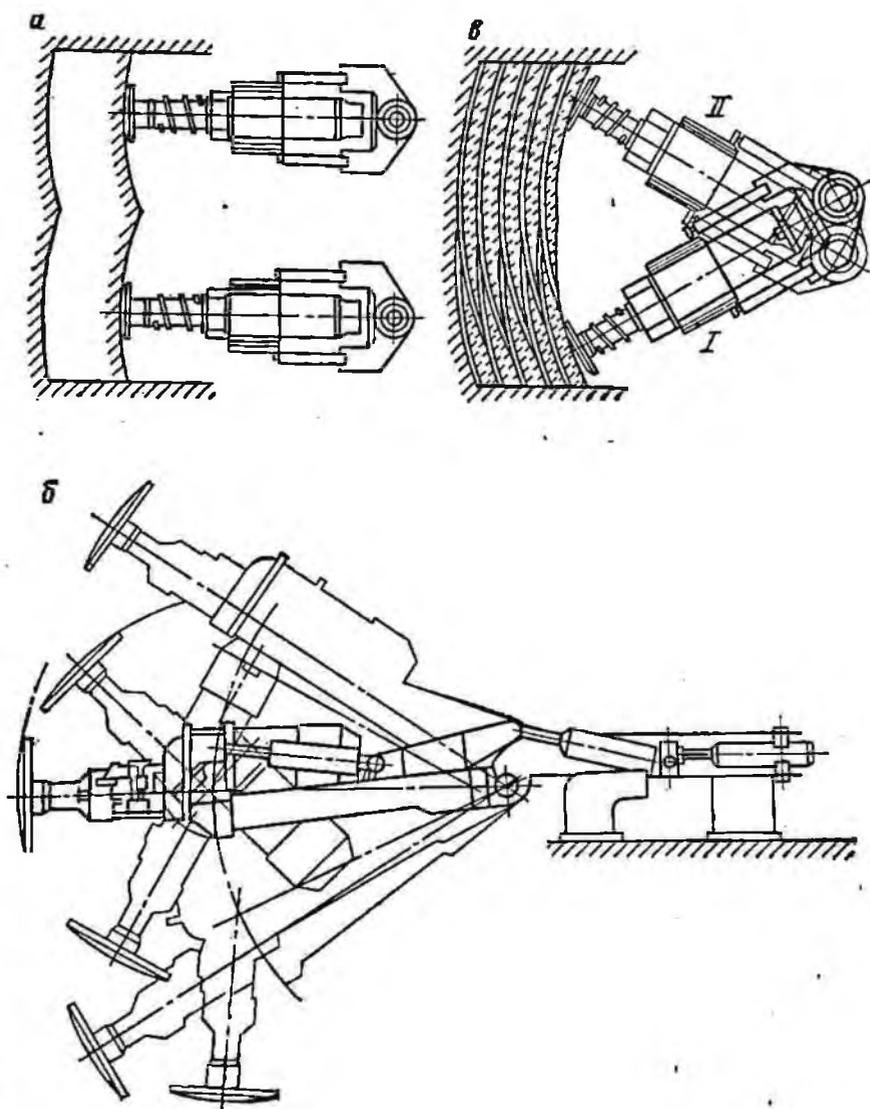


Рис. 78. Схемы зарубки исполнительного органа в породный массив.

На рис. 79, а показана схема механизма смещения, сущность которой состоит в том, что плита, несущая на себе исполнительный орган, связана с рамой комбайна шарниром, расположенным на продольной оси рамы комбайна, и силовым домкратом. Ось поворота стрелы исполнительного органа смещается относительно продольной оси комбайна по дугообразной направляющей. В крайних положениях плита стопорится.

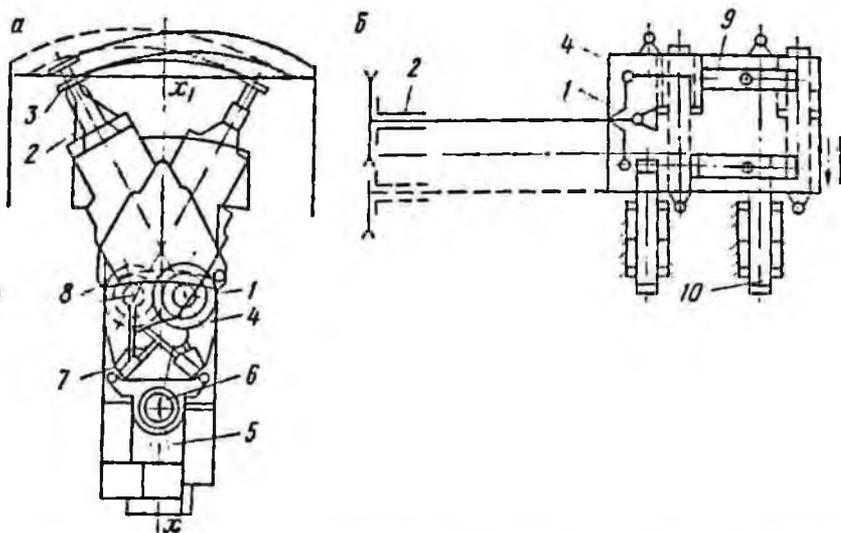


Рис. 79. Схема механизма смещения проходческого комбайна «Алмаз-III»: 1 — ось поворота стрелы исполнительного органа; 2 — исполнительный орган; 3 — режущий диск; 4 — плита; 5 — рама; 6 — шарнир; 7 — силовой домкрат поворота плиты; 8 — дугообразная направляющая; 9 — силовой домкрат поворота стрелы; 10 — силовой домкрат перемещения плиты

В горизонтальной плоскости исполнительный орган придает забою заостренную форму в сторону комбайна, образованную двумя вертикально вогнутыми поверхностями. Режущий диск при этом боковым врезанием будет заходить в забой без создания специальных опережающих скважин или ниш. Запиная поочередно правое или левое положение, исполнительный орган разрушает половину забоя. В такой же последовательности обрабатывается другая половина забоя.

Механизм смещения исполнительного органа при параллельном перемещении его по прямолинейным направляющим, перпендикулярным к продольной оси комбайна, показан на рис. 79, б. Два домкрата перемещают до упора платформу в одну сторону и фиксируют ее, а два других — в противоположную сторону. При величине смещения оси поворота исполнительного органа от оси комбайна на величину 0,4 м достигается увеличение площади сечения проводимой выработки до 20 м<sup>2</sup>.

Ниже приведена сравнительная характеристика трех типов

алмазных дисков, которые применялись при разрушении ка-  
рагандинского песчаника.

Техническая характеристика алмазных дисков

	Типа АОК	Для комбайна «Алмаз-1»	Для комбайна «Алмаз-1И»
Диаметр диска, м . . . . .	0,8	0,63	0,82
Ширина диска (по наружным кромкам сег- ментов), м . . . . .	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$34 \cdot 10^{-3}$	$45 \cdot 10^{-3}$
Зернистость алмазов, . . . . .	A800/630	A800/630	A630/500
Концентрация алмазов, % . . . . .	12,5	12,5	12,5
Тип связи . . . . .	M50	M50	M50
Число сегментов . . . . .	48	40	80
Число линий резания . . . . .	1	2	2*
Расстояние между сегментами в линии ре- зания, м . . . . .	$12,3 \cdot 10^{-3}$	$38,9 \cdot 10^{-3}$	$32,8 \cdot 10^{-3}$
Размеры сегментов, м:			
ширина . . . . .	6,5	15	15
высота . . . . .	7	10	10
длина . . . . .	40	30	30

\* Диск имеет центральный скалыватель для удаления междучелевого пеллика породы

Как видно из характеристики, диски комбайнов «Алмаз-1» и «Алмаз-1И» имеют по две режущих поверхности, в которых алмазные сегменты расположены на большем расстоянии друг от друга, чем у диска типа АОК, что улучшает вынос штыба из зоны разрушения. С целью повышения устойчивости и сопротивляемости раскалыванию ширина сегментов увеличена от  $6,5 \cdot 10^{-3}$  до  $15 \cdot 10^{-3}$  м, а их длина уменьшена от  $40 \cdot 10^{-3}$  до  $30 \cdot 10^{-3}$  м по сравнению с сегментами серийного алмазного диска.

Повышение производительности комбайна достигается увеличением количества одновременно работающих алмазных дисков и отрывников [19, 27]. Исполнительный орган комбайна «Алмаз-1М» (рис. 80) обеспечивает проведение подготовительных выработок трапецидального сечения, а исполнительный орган комбайна «Алмаз-1МА» (рис. 81) — круглого и арочного. Для проведения выработок арочного сечения исполнительный орган комбайна «Алмаз-1МА» оснащается бермовыми фрезами.

В исполнительном органе комбайна «Алмаз-1М» ось вращения сферических дисков наклонена к горизонтальной плоскости под углом, равным углу наклона боковой стенки выработки. Длина спаренных стрел не одинакова — верхняя стрела короче нижней. Консоли вилок по длине также различны и выполнены с таким расчетом, что при совмещении осей стрел в одной плоскости наиболее удаленные от оси вертикальной колонны точки алмазного диска лежат на линии, наклон которой к почве выработки такой же, как и наклон боковой стенки выработки. Находясь в исходном положении у поверхности за-

боя, стрелы исполнительного органа разводятся на угол, несколько больший  $180^\circ$ , в результате чего обеспечивается врезание сферических дисков при дуговой подаче исполнительного органа на забой. Механизм подачи с моментным гидродвигателем и поворотным устройством перемещает одновременно нижнюю спаренную стрелу слева направо, а верхнюю — справа налево. После того как верхняя спаренная стрела занимает левое исходное положение, а нижняя — правое, осуществляется новый цикл.

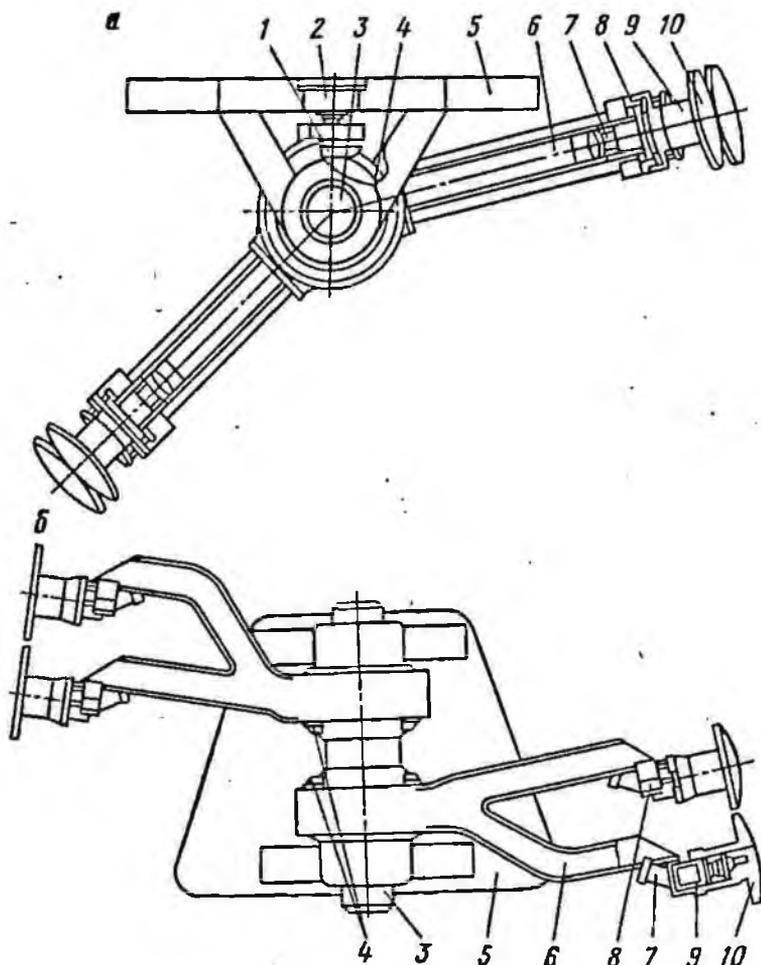


Рис. 80. Конструктивная схема исполнительного органа комбайна «Алмаз-1М»:

а — вид сверху; б — вид спереди 1 — ведущая шестерня; 2 — моментный секционный гидродвигатель; 3 — колонка; 4 — верхний и нижний зубчатые секторы; 5 — несущая рама; 6 — верхняя и нижняя спаренные жесткие стрелы; 7 — гидродвигатель; 8 — гидродомкрат; 9 — отрывник; 10 — сферический диск

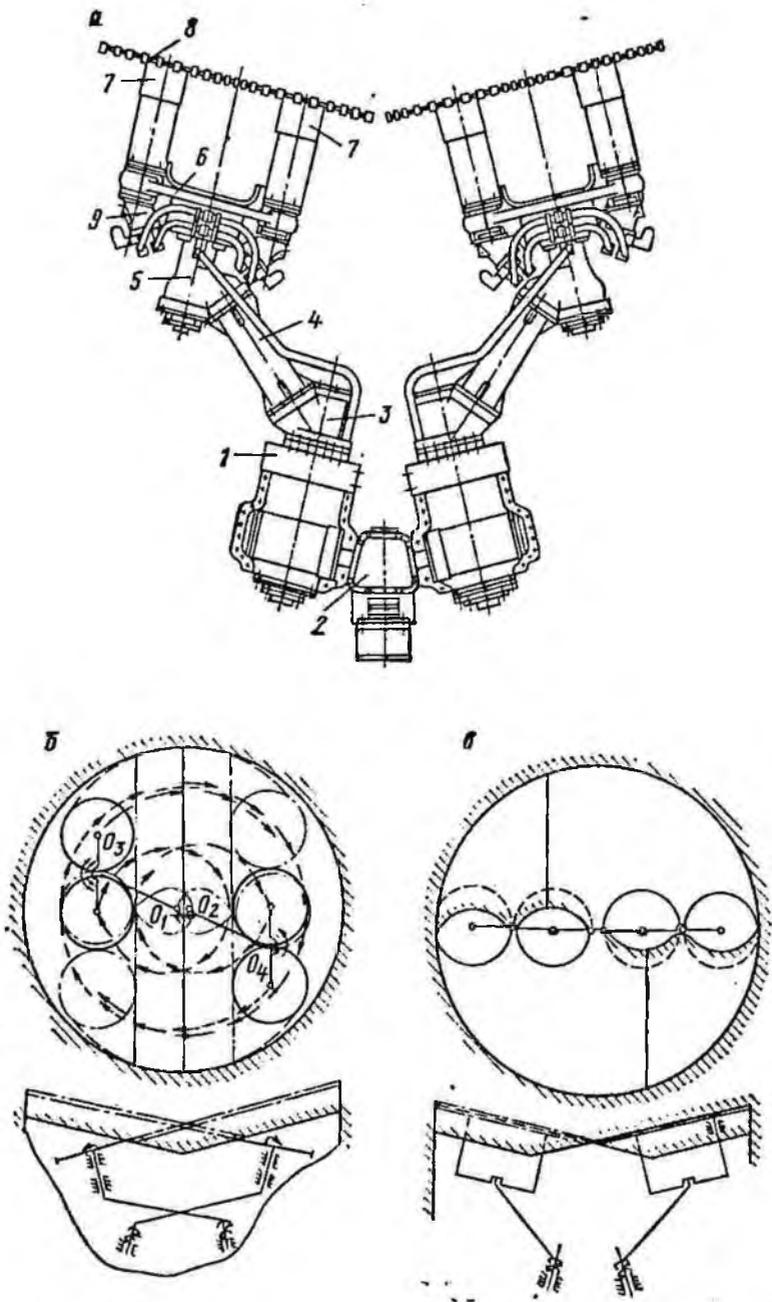


Рис. 81. Конструктивная схема (а) исполнительного органа комбайна «Алмаз-1МА» и схемы обработки забора (б, в):  
 1 — колесчатые водила; 2 — привод; 3 — опорное колено; 4 — промежуточная проставка; 5 — колено; 6 — несущая скоба; 7 — отрывник; 8 — диск; 9 — гидродвигатель

Исполнительный орган комбайна «Алмаз-1МА» представляет собой два консольных коленчатых водила, оси качания которых расположены в горизонтальной плоскости под некоторым углом к оси выработки.

В процессе разрушения массива каждая пара дисков образует плоскую поверхность, так что забой имеет форму тупоугольного уступа с вертикальными плоскостями, линия пересечения которых проходит через центр выработки. Перед каждым циклом режущие диски находятся в нерабочей зоне, а их плоскости вращения соответственно параллельны обрабатываемым плоскостям уступа (см. рис. 81).

Водила качаются в противоположных направлениях вокруг точек  $O_1$  и  $O_2$ , а режущие диски прорезают в массиве щели, соответственно параллельные образованным ранее плоскостям, поворачиваясь при этом вокруг точек  $O_3$  и  $O_4$ . Траектория движения дисков за цикл близка к круговой. Незначительное отклонение от круговой траектории получается за счет относительного поворота дисков вокруг точек  $O_3$  и  $O_4$ . На рис. 81, б изображены режущие диски в середине цикла, когда оси вращения всех дисков расположены в одной горизонтальной плоскости, проходящей через центр выработки. В конце цикла диски занимают положение (на рисунке показано штрих-пунктирными линиями), из которого производится подача исполнительного органа на забой для выполнения следующего цикла.

Алмазные диски комбайна «Алмаз-1МА» в отличие от дисков комбайна «Алмаз-1М» плоские, они разрушают забой с образованием плоских щелей.

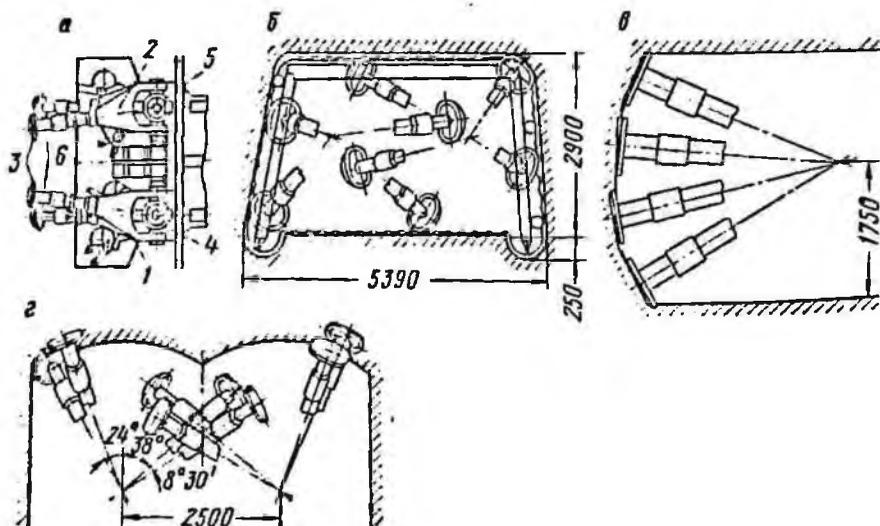


Рис. 82. Конструктивная схема (а) исполнительного органа комбайна «Алмаз-БПП» и схемы обработки забоя (б—2):

1—2 — левая и правая консольные стрелы; 3 — алмазные диски; 4, 5 — оси; 6 — гидроотрывники

Исполнительный орган комбайна «Алмаз-5ПП» (рис. 82) оснащен спаренными стрелами, установленными на цапфах механизма поворота, который обеспечивает синхронное перемещение в противоположные стороны в горизонтальной плоскости. Каждая стрела имеет два сферических алмазных диска и два гидрострывника. V-образная форма стрел позволяет осуществлять их перекрещивание вне забоя по вертикальной оси сечения выработки. Верхние рукоятки правой и левой стрел смещены внутрь на  $8^{\circ}30'$  с целью получения трапецевидальной формы сечения выработки.

Исполнительный орган комбайна «Алмаз-5» [19] (рис. 83) имеет штрипсы, выполненные в виде секторов с режущими кромками, оснащенными алмазными сегментами по дуге постоянного радиуса, и скальвающие ролики и коромысло, жестко закрепленные на общем горизонтальном валу. Силовые домкраты шарнирно связаны одним концом с плечами коромысла, а другим — с рамой комбайна.

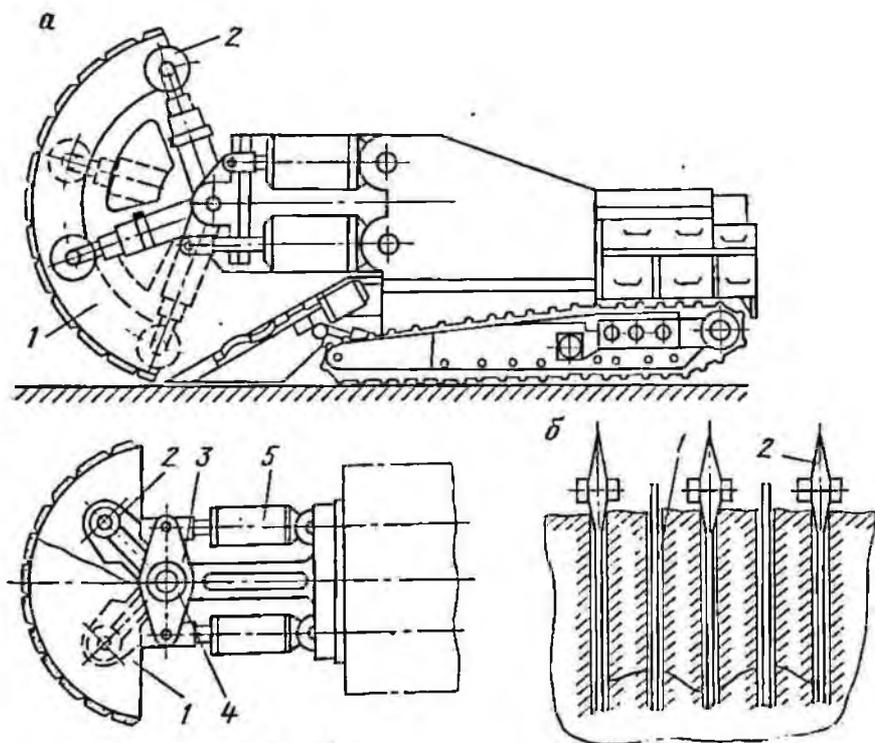


Рис. 83. Конструктивная схема (а) исполнительного органа комбайна «Алмаз-5» и схема разрушения забоя (б):

1 — алмазные штрипсы; 2 — скальвающие ролики; 3 — коромысло; 4 — вал; 5 — силовые домкраты

Попеременным включением верхних и нижних домкратов производится качание режущего инструмента относительно общего горизонтального вала, а при одновременной подаче исполнительного органа на забой — прорезание щелей в массиве. При достижении определенной высоты междущелевых целиков скальвающие ролики, упираясь в междущелевые целики породы, разрушают их.

Рассмотренные конструктивные решения исполнительных органов породопроходческих комбайнов, в которых используется алмазный породоразрушающий инструмент, показывают, что имеющиеся технические средства дают возможность решить задачу комбинированного разрушения пород средней крепости и крепких при проведении подготовительных горных выработок. При этом конструкции исполнительных органов отличаются компактностью из-за отсутствия громоздких понижающих редукторов, не требуют высоких напорных усилий, что значительно снижает массу комбайна и расширяет область его применения, позволяют сравнительно легко их перенастраивать при изменении сечения и формы выработки.

## § 2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ ДЛЯ БУРЕНИЯ ШПУРОВ И СКВАЖИН

Несмотря на быстрые темпы оснащения шахт и рудников проходческими комбайнами, еще длительное время буровзрывной способ будет оставаться преобладающим, а задачи совершенствования бурильных машин и инструмента актуальными.

Колонковым сверлам, в том числе и оснащенным алмазным инструментом, присущ общий недостаток: большая часть времени бурения затрачивается на вспомогательные операции (60—80%). Так, на замену штанги приходится 22,6—40% времени, на бурение — 6%, настройку сверла — 15%, замену коронок — 5,2%, отвод штанги — 7,1% [23]. Опыт показал, что сокращения времени на выполнение вспомогательных операций бурения можно достичь применением длинноходовых электро-сверл, обеспечивающих бурение шпуров на полную глубину без многократных перестановок и замены штанг. Применительно к алмазным сверлам большая эффективность достигается применением машин, оснащенных несколькими одновременно работающими длинноходовыми сверлами. К таким машинам относится шестисверловая буровая каретка ШБК-1 [34] с распорными полубалками, которая обеспечивает проведение наиболее распространенных двухлутных горизонтальных и наклонных выработок трапецидального и арочного сечения.

Каретка (рис. 84) подводится к забою на необходимое расстояние и крепится к рельсам. Рама распирается в тележку, а полубалки — в бока выработки. Автоподатчикам задают направление бурения, и они распираются в забой. Обувив один

ряд шпуров, полубалки поднимаются на заданную величину, затем производится обуривание следующего ряда и т. д. После обуривания забоя каретка складывается в транспортное положение и отгоняется. При этом траверса с полубалками опускается вниз, автоподатчики электросверл устанавливаются вдоль полубалок, а последние с помощью ручной лебедки разворачиваются вдоль вертикальной рамы. Направляющая рама, которая крепится к ходовой тележке с помощью шарниров, освобождается от распора и укладывается горизонтально. Высота каретки в транспортном положении 2,04 м, а ширина 1,49 м.

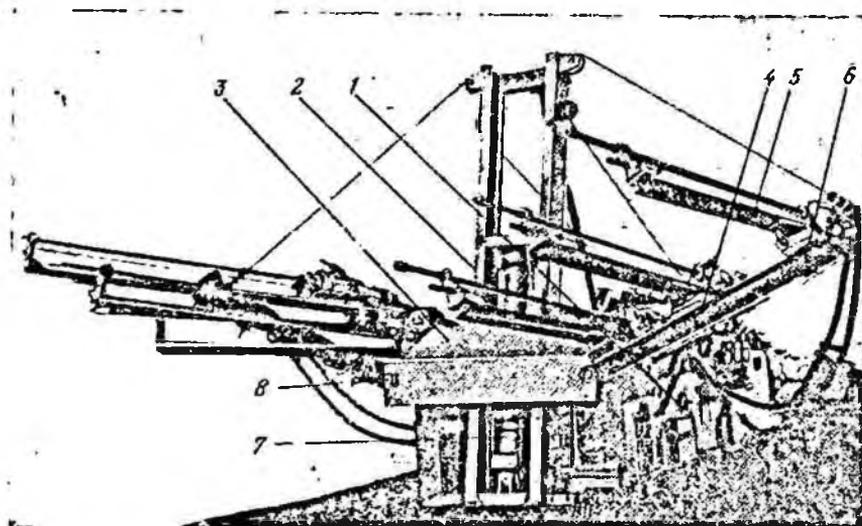


Рис. 84. Буровая каретка ШБК-1:

1 — ходовая тележка; 2 — направляющая рама; 3 — траверса; 4 — распорная полубалка; 5 — автоподатчик; 6 — электрические сверла; 7 — гидроцилиндр подъема; 8 — оси поворота полубалок

Вниз траверса перемещается под действием собственного веса, а вверх — силовым гидродомкратом, шток которого шарнирно соединен с коромыслом, позволяющим равномерно распределить усилие, создаваемое гидродомкратом на две цепи. Одним концом цепи крепятся к нижней части вертикальной рамы, другим — к подвижной каретке. Цепи пропускаются через ролики, укрепленные на осях по концам коромысла. Распорная полубалка, выполненная в виде гидродомкрата диаметром 130 мм, на конце имеет шаровую пятую с опорной плитой, упирающейся при распоре в бока выработки.

Испытания опытного образца шестисверловой буровой каретки ШБК-1 проводились в забое квершлага 4-го горизонта пласта  $K_2$  на пласт  $K_4$  на шахте «Западная» объединения «Ка-

рагаандауголь». Забой выработки с площадью поперечного сечения в свету  $11,3 \text{ м}^2$  слагался песчанками среднезернистой структуры с коэффициентом крепости от 6 до 9 по шкале проф. М. М. Протодяконова и сопротивляемостью одноосному сжатию от 60,4 до 91,5 МН/м<sup>2</sup>.

Обслуживание буровой каретки производилось тремя проходчиками, которые выполняли следующие операции: крепление каретки к рельсам на необходимом расстоянии от забоя, распор рамы в тележку и полубалок в бока выработки, управление манипуляторами, ходовой частью и автоподатчиками. За время шахтных испытаний пробурено 400 м шпуров. Испытания подтвердили эффективность алмазного бурения и работоспособность конструкции в целом.

Хронометражные наблюдения, проведенные при работе каретки, показали, что основное рабочее время бурения составляет 36%, в том числе время чистого бурения — 10%, подготовительных операций — 6,9% и вспомогательных — 19,1%. Время простоев, связанных с неисправностью каретки, равнялось 5,5%, а время заключительных операций — 4,1% продолжительности смены. Производительность бурения составила  $8,5 \cdot 10^{-3}$  м/с, средняя механическая скорость бурения шпура при бурении одним сверлом оказалась равной  $22 \cdot 10^{-3}$  м/с, а при бурении одновременно шестью сверлами —  $5,5 \cdot 10^{-3}$  м/с, что объясняется отсутствием синхронности в работе сверл.

Сравнительные данные о работе буровой каретки ШБК-1 и сверла ЭКБ-2М в этом забое свидетельствуют о том, что затраты времени на бурение 1 м шпура и продолжительность вспомогательных операций при использовании каретки ШБК-1 в 6,6 и в 7,5 раза меньше, а средняя механическая скорость бурения и производительность бурения соответственно в 15 и 6,7 раз выше, чем у сверл ЭКБ-2М.

Буровая каретка механизмирует бурение одновременно шестью длинноходовыми электросверлами без применения ручного труда, что сокращает время обуривания забоя и снижает трудоемкость процесса; устанавливает сверла под любым углом к забою, что позволяет бурить рациональные типы шпуров. Управление приводами механизмов каретки дистанционное, что обеспечивает безопасность работ.

Значительный интерес представляет изыскание возможности использования импрегнированного алмазного инструмента для бурения скважин.

Карагадинским политехническим институтом разработана конструкция бурового инструмента в виде алмазно-планетарной буровой головки для бурения в породах с коэффициентом крепости по шкале М. М. Протодяконова 10 и выше. Инструмент выполнен в виде алмазного планетарного исполнительного органа, оснащенного алмазными режущими элементами, рабочая поверхность которых представляет собой усеченные сферы, ар-

### Техническая характеристика буровой каретки ШБК-1

Тип инструмента . . . . .	Алмазная импрегни-
Число электросверл . . . . .	рованная коронка
Ширина колен, м . . . . .	6
Маслонасос: . . . . .	0,6
тип . . . . .	Г-12-23А
подача, л/с . . . . .	0,4
рабочее давление, МН/м <sup>2</sup> . . . . .	6,4
Габариты в рабочем положении, мм:	
длина . . . . .	3900
ширина . . . . .	4800
высота . . . . .	1500
Масса каретки, кг . . . . .	3500

мированные по периферии алмазными сегментами. Создание такого инструмента для разрушения крепких пород при бурении скважин позволяет на основе применения алмазов зернистостью А630/500—А1000/800 обеспечить равномерный и полный износ в процессе работы благодаря одинаковой абсолютной скорости резания для всех алмазных зерен и, как следствие этого, одинаковой нагруженности инструмента по всей его рабочей поверхности [2].

Характерной особенностью алмазной планетарной буровой головки с турбинным приводом (рис. 85), инструмент которой выполнен в виде усеченных сфер, армированных по периферии алмазными сегментами, является эффективная скорость резания мелкоалмазным инструментом в диапазоне 30—50 м/с. Это определяет малые усилия резания, а следовательно, и малые крутящие моменты на рабочем валу, что облегчает конструктивную компоновку мощных и малогабаритных планетарных органов. Расчеты и конструктивная разработка показали, что таким инструментом могут буриться скважины диаметром 0,15 м и более. Алмазные сегменты располагают только по периферийной части, и поэтому обработка всего забоя производится быстро вращающимися дисками при их планетарном движении вокруг вертикальной оси бурового снаряда. Для предотвращения попадания абразивного материала к подшипниковым узлам буровой головки и обеспечения охлаждения рабочей поверхности дисков жидкость подается через полый корпус бура к центру вращающихся дисков так, что омывает подшипниковые узлы и далее движется под действием напора и центробежных сил от подшипниковых узлов по внутренней поверхности дисков и через радиальное отверстие в них непосредственно в зону разрушения. Диаметр дисков и угол наклона их осей выбраны с учетом обеспечения полной обработки забоя в процессе бурения скважины.

Относительное движение режущие элементы получают непосредственно от привода через центральный вал планетарного редуктора, зубчатую муфту и распределительный редуктор.

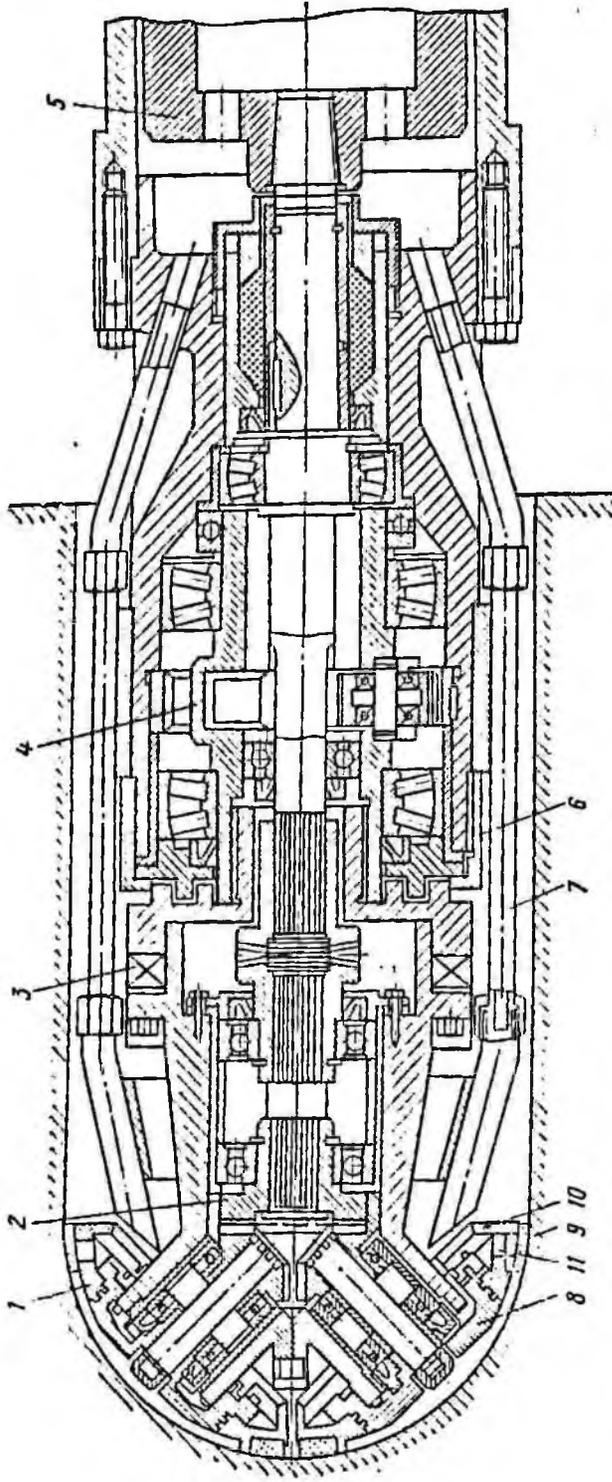


Рис. 85. Алмазная планетарная буровая головка с турбинным приводом:

1 — режущие элементы; 2 — распределительный редуктор; 3 — кулачковая муфта; 4 — планетарный редуктор; 5 — корпус привода; 6 — зубчатая муфта; 7 — каналы для охлаждающей жидкости; 8 — ступица режущего диска; 9 — алмазные сегменты; 10 — конусные перегородки; 11 — межсегментные отверстия

Переносное движение режущих элементов осуществляется за счет их вращения вместе с корпусом распределительного редуктора. Для охлаждения режущих элементов и транспортирования отбитой породы в зону резания подается охлаждающе-транспортирующая жидкость.

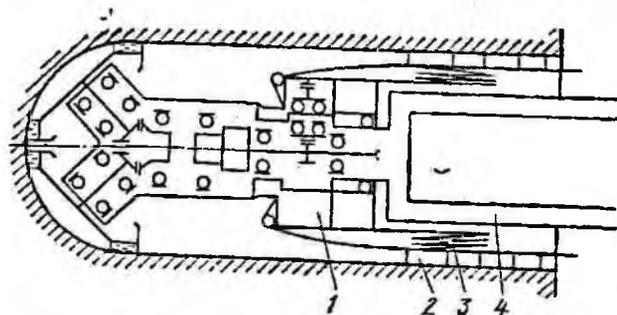


Рис. 86. Кинематическая схема алмазной планетарной буровой головки с роторным приводом:

- 1 — планетарный редуктор; 2 — тормозные элементы;  
3 — пластинчатые пружины; 4 — приводящая штанга

На рис. 86 показана кинематическая схема алмазной планетарной буровой головки, подвод мощности к которой осуществляется через водило планетарного редуктора с помощью вращающейся штанги. Такая конструкция обеспечивает применение алмазного планетарного инструмента на существующем в настоящее время оборудовании вращательного бурения.

Получение скоростей резания, необходимых для эффективного разрушения пород при бурении, достигается фиксацией корпуса планетарного редуктора в скважине тормозными элементами. Планетарный редуктор при такой схеме обеспечивает относительное движение инструмента и работает как повышающий, а переносное движение осуществляется вращением приводящей штанги. Тормозные элементы распираются в стенку скважины пластинчатыми пружинами, которые обеспечивают усилие, необходимое для создания тормозного момента, с учетом возможного изменения диаметра скважины при износе инструмента.

При разрушении горных пород типа песчаников с коэффициентом крепости до 8—10 по шкале проф. М. М. Протоdjяконова удельные затраты энергии на разрушение алмазным инструментом составляют 226—360 МДж/м<sup>3</sup> [36]. Из этого следует, что при установленной мощности существующих современных буровых станков с применением алмазного инструмента обеспечивается повышение скорости бурения в 2—4 раза при одних и тех же затратах на материалы. Относительно невысокая стоимость импрегнированного алмазного инструмента

и высокая его стойкость обеспечивают экономию по инструменту до 40 тыс. руб. в год на один станок. В связи с тем, что разрушение горных пород таким инструментом происходит на больших скоростях с малыми усилиями резания и подачи, буровое оборудование значительно облегчено, что снижает его стоимость и повышает маневренность.

### § 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

Практика показывает, что применение алмазного инструмента на отдельных видах работ без достаточного обоснования может не только не улучшить технико-экономические показатели работы машины, но иногда ухудшить их. Особенно важно обоснование использования инструмента при проектировании новых машин для выполнения работ, в которых алмазный инструмент ранее не применялся или применялся ограниченно.

При этом большое значение приобретает задача выбора экономичных режимов разрушения пород как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации машин. Решение этой задачи возможно формализованными методами с использованием критериев, оценивающих эффективность работы машины в любой момент времени. Показатель эффективности, выбранный в качестве критерия, должен учитывать механические свойства горной породы, схемы и условия разрушения, характеристики исполнительного органа и инструмента, режимы его работы. Кроме того, он должен учитывать организацию работ и нормативные показатели по отрасли.

В настоящее время используется ряд показателей эффективности работы машины, играющих роль критериев: производительность, себестоимость единицы или объема продукции, капитальные вложения на единицу мощности, приведенные затраты [3, 9, 22, 29]. Все они отличаются друг от друга степенью учета затрат на этапах создания и эксплуатации машины, находятся на разных уровнях иерархии в системе частных показателей эффективности предприятия или народного хозяйства в целом, имеют разные возможности аддитивной связи по уровням одноименных критериев этой системы. Анализ требований, предъявляемых сегодня к созданию частных критериев эффективности, в масштабе всего народного хозяйства показал, что применительно к породоразрушающим машинам, оснащенным алмазным инструментом, наиболее удачными являются критерии минимума себестоимости и приведенных затрат на производство продукции. В этом случае решается задача не только определения величины критерия, но и оптимизации отдельных параметров разрушения.

Применение критерия минимума себестоимости в процессах разрушения пород алмазным инструментом показывает воз-

возможность оптимизации режимов, но структуру себестоимости различные исследователи представляют неодинаково. Это вызвано тем, что расчет себестоимости выполняется для конкретных условий эксплуатации инструмента. Так, могут рассматриваться две математические модели — при резании камня на одном станке и при конвейерном способе обработки камня [6]. В первом случае уравнение полной себестоимости имеет вид

$$y = C_1^* \tau_1 + C_1 (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5) + qC_2, \quad (121)$$

а во втором случае

$$y = C_m + \sum_{j=1}^n (C_{1j}^* \tau_k + C_{5j} \tau_k + C_{1j}^* \tau_{1j} + C_{2j} q_j), \quad (122)$$

где  $\tau_1 = C_1 - C_1 + C_5$  — машинное время на обработку 1 м<sup>2</sup> камня;  $C_1^*$  — стоимость электроэнергии в единицу времени;  $\tau_2$  — вспомогательное время;  $\tau_3$  — время для ухода за рабочим местом;  $\tau_4$  — время перерывов на отдых и естественные надобности;  $\tau_5$  — подготовительно-заключительное время;  $C_1^*$  — тарифная ставка рабочего в единицу времени;  $C_5$  — стоимость содержания оборудования, ремонта и амортизационных отчислений;  $C_2$  — стоимость 1 кар в инструменте;  $q$  — удельный износ инструмента;  $C_m$  — стоимость заготовки;  $n$  — число операций обработки заготовки;  $\tau_k$  — продолжительность цикла обработки;  $C_{1j}^* \tau_k$  — расходы на зарплату;  $C_{1j}^* \tau_{1j}$  — расходы на электроэнергию и материалы;  $C_{5j} \tau_k$  — стоимость содержания оборудования и амортизационных расходов;  $C_{2j} q_j$  — стоимость инструмента.

В другой работе [37] уравнение общей себестоимости при распиловке камня на одном станке имеет вид

$$C_t = (C_m + C_s)(t_s + t_m) + PC_p t_s + \frac{P}{R}; \quad (123)$$

где  $C_t$  — общая стоимость распиловки;  $C_m$  — стоимость амортизации, ремонта и другие расходы (отопление, освещение и т. д.);  $C_s$  — зарплата рабочих;  $t_s$  — эффективное время распиловки 1 м<sup>2</sup>;  $t_m$  — непроизводительно затраченное время;  $P$  — потребляемая мощность;  $C_p$  — стоимость энергии;  $R$  — стойкость алмазного инструмента.

Формулы (121) и (123) имеют одинаковую структуру. Отличие формулы (121) состоит в большей детализации непроизводительно затраченного времени и в учете затрат на электроэнергию. В формуле (123) учитывается расходуемая энергия, а не мощность привода, что является более правильным, так как с увеличением производительности расход энергии увеличивается.

В случае использования горной машины непосредственно в

забое общая себестоимость  $C_{об}$  может быть описана через свои составные части в следующем виде:

$$C_{об} = C_{и} + C_{э} + C_{зп} + C_{а}, \quad (124)$$

где  $C_{и}$  — стоимость инструмента, израсходованного на  $1 \text{ м}^2$  разрушенной поверхности породы или на  $1 \text{ м}$  скважины;  $C_{э}$  — стоимость электроэнергии;  $C_{зп}$  — расходы по заработной плате рабочих, непосредственно занятых па обслуживании машины;  $C_{а}$  — амортизационные отчисления и затраты на ремонт, монтаж и демонтаж оборудования.

Последняя формула позволяет учитывать только прямые затраты на разрушение породы, так как на горных работах непрямые затраты времени определяются эксплуатационным коэффициентом  $K_0 = \frac{T_m}{T_{об}}$ , где  $T_{об}$  — сменный, месячный или годовой баланс рабочего времени. Критерием при оптимизации является минимум функций (121), (123) и (124) в зависимости от режимов разрушения.

Использование приведенных выше формул для оптимизации режимов работы вполне правомерно применительно к комплексу машин или новой технологии. В нашем случае, когда речь идет об эффективности алмазного породоразрушающего инструмента, эти формулы не всегда удобны. Непроизводительное затраченное время изменяется в несколько раз в зависимости от характера работ, выполняемых исполнительным органом горной машины, технологии и организации работ. При добыче горной массы или блоков породы из массива величина этого времени достигает 50—60%, а при бурении геологоразведочных скважин нередко составляет всего 10%. При распиловке блоков полосовыми пилами непрямое время составляет 10—15%, а при окантовке породных плит однодисковыми машинами — 60%. Кроме того, для горных машин, оснащенных алмазным инструментом, время, затрачиваемое на собственно процесс разрушения породы, также неодинаково.

Анализ составных частей себестоимости показывает, что при высокой стоимости горной машины расходы на амортизацию и ремонт достигают 40% общей себестоимости. Это предопределяет сравнительно слабое влияние других частей себестоимости и отдельных параметров, что может привести к ошибкам при выборе режимов работы. Показатель себестоимости, применяемый в качестве единственного критерия эффективности при создании новой техники, недостаточно учитывает величину капитальных вложений. Для достижения низкой себестоимости могут потребоваться большие капитальные затраты, которые учитываются в себестоимости только через амортизационные отчисления. Но амортизация не учитывает ущерба от замораживания на длительный срок капитальных вложений.

Анализ требований, предъявляемых к частным критериям эффективности, показал, что наиболее удачным является критерий приведенных затрат [11]. Он может использоваться для оценки проектов, вариантов, образцов новой техники и технологии и обладает следующими достоинствами:

учитывает все затраты на любом этапе оценки с нарастающим итогом (от момента начала проектирования до полного износа машины);

на протяжении рассматриваемого периода определяет всю ожидаемую динамику затрат;

учитывает дополнительный эффект, получаемый предприятием за счет притока средств в случае экономичной эксплуатации машины в течение периода оценки;

дает возможность аддитивной связи на всех уровнях иерархии системы народнохозяйственных критериев по данному показателю.

Обычно используется показатель удельных приведенных затрат, который имеет следующие формы:

при дискретном учете фактора времени

$$S_{\text{д}} = \sum_{\tau=0}^T \left[ \frac{1}{Q_{\tau}} (E_{\text{к}} K_{\tau} + I_{\tau}) (1 + E_{\text{ип}})^{-\tau} \right] \cdot \frac{\text{руб.}}{\text{ед. объема работ}}, \quad (125)$$

где  $T$  — принятый период оценки, лет;  $\tau$  — интервал дискретности, ед. времени;  $\tau = 0, 1, 2, \dots, T$ ;  $K_{\tau}$  — капитальные вложения за период времени  $\tau$ , руб.;  $I_{\tau}$  — эксплуатационные издержки за период  $\tau$ , руб.;  $Q_{\tau}$  — производительность процесса за период времени  $\tau$ , ед. объема работ;  $E_{\text{к}}$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $E_{\text{ип}}$  — нормативный коэффициент для приведения разновременных затрат;

при непрерывном учете фактора времени

$$S_{\text{н}} = \int_0^T \left[ \frac{1}{Q} (E_{\text{к}} K + I) (1 + E_{\text{ип}})^{-\tau} \right] d\tau. \quad (126)$$

где  $Q$  — текущая производительность;  $K$  — текущие капитальные вложения;  $I$  — текущие эксплуатационные издержки.

В условиях эксплуатации алмазного инструмента при разрушении горных пород более приемлемым является дискретная форма учета фактора времени, так как в практике необходимо знать затраты годовые, месячные, сменные, часовые или минутные. Для того чтобы показатель  $S_{\text{д}}$  можно было использовать в качестве целевой функции при выборе режимов разрушения, необходимо в его состав ввести переменные, характеризующие эффективность применения инструмента или машин в конкретных условиях эксплуатации.

Показатели, входящие в состав  $S_{\text{д}}$ , формируются под влия-

нием механических свойств горных пород ( $P_k$ ), конструкции, геометрии и характеристики инструмента ( $R$ ), режимов разрушения ( $v_n$ ), условий и организации горных работ ( $K_0$ ). Следовательно, для породоразрушающей машины необходимо получить функционал вида

$$S_n = \vec{F}(P_k, R, v_n, K_0), \quad (127)$$

где вектор функции определяется через независимые переменные, взаимосвязанные между собой аналитическими или эмпирическими зависимостями. Если разделить переменные  $x_i$ , входящие в функционал  $S_n$ , на управляемые параметры (их можно изменять в процессе разрушения породы дискретно или непрерывно) и неуправляемые (задаваемые), то при заданных неуправляемых параметрах решается задача определения экстремума целевой функции

$$S_n = \vec{F}(P_k, R, v_n, K_0) \rightarrow \min \quad (128)$$

при ограничениях  $x_i \in A$ .

Найденные исходя из условия (128) значения управляемых параметров являются оптимальными. Число переменных, определяемых в процессе решения задачи оптимизации, ограничивается лишь возможностями вычислительной техники. Зная механические свойства пород и организацию работы на весь рассматриваемый период времени, можно определить оптимальные параметры инструмента и допустимые области изменения режимов резания еще на этапе проектирования машины. Можно также в процессе эксплуатации машины при заданных параметрах инструмента определять текущие значения оптимальных режимов. Следовательно, целевая функция (128) позволяет решать задачу выбора оптимальных параметров разрушения, так и в процессе его эксплуатации.

машинами различной конструкции как на этапе проектирования

Кроме функции цели при решении задачи оптимизации нужно ввести ограничения, определяющие область существования независимых переменных и целевой функции. В общем виде порядок решения задачи выбора оптимальных параметров разрушения может быть следующим: выбор управляемых параметров функции цели; определение неуправляемых параметров и периода  $t$ ; определение постоянных значений неуправляемых параметров; установление аналитических, эмпирических зависимостей, системы ограничений целевой функции; выбор метода поиска экстремума целевой функции; разработка алгоритма и программы решения задачи.

В соответствии с порядком решения задачи применительно к машинам, оснащенным алмазными коронками, полосовыми пилами и режущими дисками, определим управляемые пара-

метры. В предыдущих главах установлено, что показатели процесса разрушения зависят от характеристики и размеров алмазного инструмента, от режимов разрушения, причем эти параметры могут намеренно изменяться. Следовательно, к управляемым параметрам относятся концентрация алмазов ( $K_0$ ), их зернистость ( $P$ ), твердость связки (HRC), размеры рабочей поверхности инструмента (для буровых коронок —  $R_n, R_{nn}$ , для режущих дисков —  $R, b$ , для полосовых пил —  $L_n, b$ ), расстояние между алмазосодержащими элементами  $l_n$  и их длина  $l_{np}$ , режимы разрушения (скорости резания  $v_p$  и подачи  $v_n$ , для режущих дисков — глубина резания  $H$ , для полосовых пил — длина рабочего хода пилы  $l_x$ ).

Прежде чем определить неуправляемые параметры, установим период оценки и интервал дискретности. В предыдущих разделах мы показали, что в условиях эксплуатации различных горных машин, оснащенных алмазным инструментом, важно оценить целесообразность применения такого инструмента с помощью критерия эффективности. В этом случае при сопоставлении рассматриваются не горная машина, не затраты, связанные с ее особенностями, а показатели работы инструмента. Одним из важных показателей, присущих инструменту, является срок его службы до износа  $T_{им}$ . На величину  $T_{им}$  влияют не только характеристика инструмента, но и режимы работы, механические свойства горных пород. Поэтому в качестве интервала дискретности принимаем  $T_{им}$ , а периода оценки  $T$  — один год. Тогда за  $\tau$ -й год эксплуатации машины будет иметь место  $m_\tau$  замен инструмента.

При таком подходе можно не рассматривать работу машины, а учитывать только те показатели и параметры, которые непосредственно связаны с инструментом. Тогда капитальные вложения  $K_\tau$  в формуле (125) равны нулю, в пределах периода оценки  $E_{ип} = 0$ , а в качестве текущих эксплуатационных издержек достаточно учитывать издержки по стоимости инструмента  $I_{са}$ , по затратам энергии на разрушение породы  $I_w$  и по прямой заработной плате рабочим, связанным с эксплуатацией инструмента,  $I_{зп}$ .

Тогда формула (125) примет вид

$$S_n = \frac{1}{n_m \sum_{m=1}^{m_\tau} T_{им} Q_m} \sum_{m=1}^{m_\tau} (n_m I_{са}^{m_\tau} + n_m I_w^{m_\tau} + I_{зп}^{m_\tau}), \quad (129)$$

где  $Q_m$  — техническая часовая производительность инструмента;  $I_{са}^{m_\tau}$ ,  $I_w^{m_\tau}$  и  $I_{зп}^{m_\tau}$  — издержки по разрушению породы за период  $T_{им}$  срока службы одного инструмента;  $n_m$  — число одновременно работающих однотипных инструментов с производительностью  $Q_m$ .

Очевидно, что значения  $S_{\Pi}$  по формуле (129) не являются удельными приведенными затратами на производство единицы продукции. Но как критерий эффективности применения инструмента различной характеристики и оптимизации режимов его работы такая функция обладает некоторыми преимуществами (см. ниже). Число инструментов, израсходованных в период оценки,  $m_{\tau}$  определяется по формуле

$$m_{\tau} = \frac{T_{\kappa} K_{\tau}}{T_{\text{ин}}}, \text{ шт.}, \quad (130)$$

где  $T_{\kappa}$  — годовой фонд рабочего времени, ч.

В практике эксплуатации горных машин наибольшее распространение получил двухсменный режим работы при непрерывной или прерывной рабочей неделе. В первом случае  $T_{\kappa} = 5768$  ч, во втором  $T_{\kappa} = 4368$  ч. Время работы инструмента до полного износа рассчитывается из выражения

$$T_{\text{ин}} = \frac{P_{\alpha}}{\Delta q Q_{\alpha}}, \text{ ч}, \quad (131)$$

где  $P_{\alpha}$  — масса алмазов в алмазосодержащем слое инструмента, кар;  $\Delta q$  — удельный износ алмазов в инструменте, кар/м<sup>2</sup>.

Издержки по стоимости инструмента  $H_{\text{са}}$  можно рассчитать по формуле

$$H_{\text{са}}^{m_{\tau}} = P_{\alpha} C_{\alpha}, \text{ руб.}, \quad (132)$$

где  $C_{\alpha}$  — стоимость 1 кар алмазов в инструменте, руб.

Величина  $P_{\alpha}$  может быть определена, если известны концентрация  $K_{\alpha}$ , удельный вес алмаза  $\gamma_{\alpha}$  и размеры алмазосодержащей части инструмента. Наиболее распространенным приводом исполнительных органов горных машин является электрический, и применительно к нашим исследованиям следует учитывать активную энергию, расходуемую на разрушение. Тогда издержки по затратам электроэнергии на разрушение породы определяются по формуле

$$H_{\text{э}}^{m_{\tau}} = b' N_p T_{\text{ин}}, \text{ руб.}, \quad (133)$$

где  $b'$  — одноставочный тариф за 1 кВт·ч активной электроэнергии;  $b' = 0,01 \div 0,015$  руб./кВт·ч или  $b' = 2,8 \cdot 10^{-3} \div 4,2 \times 10^{-3}$  руб./МДж;  $N_p$  — мощность, расходуемая на разрушение породы одним инструментом, кВт (Дж).

Издержки по заработной плате, обусловленной только процессом разрушения без учета затрат на подготовительные и вспомогательные операции, можно рассчитать по формуле

$$H_{\text{зп}}^{m_{\tau}} = n_p T_{\tau} T_{\text{ин}}, \text{ руб.}, \quad (134)$$

где  $n_p$  — число рабочих, обслуживающих машину;  $T_{\tau}$  — часовая ставка рабочего, обслуживающего машину, руб.

Подставляя значения из формул (130) — (134) в выражение (129), после упрощений получим

$$S_{\Pi} = C_a \Delta q + \frac{b' N_p}{Q_m} + \frac{n_p T_y}{n_m Q_m}, \text{ руб./м}^2. \quad (135)$$

В уравнении (135) параметры  $C_a$ ,  $b'$ ,  $T_y$  являются неуправляемыми, а  $n_p$  и  $n_m$  следует отнести к условно управляемым, так как они зависят от конструкции машины и горных условий, но в рамках предприятия изменение их возможно. Величины  $\Delta q$ ,  $N_p$  и  $Q_m$  являются переменными и определяются механическими свойствами горных пород, характеристикой инструмента и режимами его работы. Выше нами приводились аналитические и аналитико-экспериментальные зависимости для расчета  $N_p$  и  $Q_m$ . Имеются исследования [6], в результате которых получены частные эмпирические зависимости для расчета  $\Delta q$  конкретных инструментов.

Таким образом, уравнение (135) является целевой функцией, минимизируя которую по управляемым параметрам, можно определить их оптимальные значения. Полученная целевая функция выгодно отличается от ранее рассмотренных (121), (123). Мы имеем только три нормативных параметра ( $C_a$ ,  $b'$  и  $T_y$ ), которые для целых регионов или отраслей одинаковы и стабильны в течение многих лет. Особенности горной машины учитываются числом рабочих, обслуживающих машину,  $n_p$  и числом одновременно работающего однотипного инструмента  $n_m$ . В уравнении не учитываются затраты, связанные с организацией и технологией работ, что делает целевую функцию чувствительной к изменению управляемых параметров и тем самым повышает точность расчетов. Например, при разведочном бурении на глубинах 200—300 м энергия, расходуемая на разрушение забоя коронкой, составляет 1—2% общих энергозатрат на бурение, причем это соотношение энергий постоянно изменяется с глубиной бурения. Аналогично изменяются затраты времени на извлечение керна, которые уменьшаются в несколько раз, если можно применить съемный керноприемник [23]. Пестрая картина затрат времени на подготовительно-заключительные и вспомогательные операции наблюдается при работе камнерезных машин.

Изложенные выше соображения показывают, что целевая функция (135) позволяет не только определять оптимальные параметры разрушения, но и сравнивать эффективность применения различных породоразрушающих инструментов в тех или иных условиях. Однако при этом следует помнить, что полученная при расчетах величина  $S_{\Pi}$  является условной и не отражает полных затрат на разрушение.

Выполним сравнительные расчеты для дисковых пил, плоских пил и импрегнированных коронок, принимая  $C_a =$

$= 2,5$  руб./кар;  $b' = 3,5 \cdot 10^{-3}$  руб./МДж;  $T_y = 1,2$  руб./ч;  $n_p = 1$  чел.;  $n_r = 1$  инструмент.

Размерность функции  $S_n$  для дисковых и полосовых пил — в руб./м<sup>2</sup>, а для буровых коронок — в руб./м. и руб./м<sup>2</sup>. В качестве ограничений здесь могут выступать конструктивные параметры инструмента или величина установленной мощности привода исполнительного органа горной машины. Неуправляемыми параметрами в наших расчетах являются механические свойства горных пород:  $P_k = 100 \cdot 10^7$ ;  $200 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, размеры блока породы для полосовой пилы:  $l_k = 1$ ;  $1,5$ ;  $2$  м и глубина резания для дисковой:  $H = 0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,25$  м, размеры и характеристика инструмента:  $K_n = 12,5\%$ , А800/630, радиус диска  $R = 0,4$  м, ширина  $b = 0,007$  м,  $C_1 = 0,8$ , длина полосовой пилы  $l_n = 2,5$  м, длина хода пилы  $l_x = 0,4$  м, ширина пилы  $b = 0,007$  м, коэффициент, учитывающий прерывистость рабочей поверхности полосовой пилы,  $C_1 = 0,4$ , размеры буровой коронки:  $R_n = 0,03$  м;  $R_{nn} = 0,021$  м, коэффициент, учитывающий промывочные каналы в коронке,  $C_1 = 0,85$ . Скорость резания примем постоянной: для полосовой пилы  $v_p = 1,5$  м/с, для режущего диска  $v_p = 40$  м/с и для буровой коронки  $v_p = 1,6$  м/с. Эти скорости наиболее часто применяются при эксплуатации инструмента.

В качестве переменного управляемого параметра при исследовании целевой функции рассматривается скорость подачи  $v_n$ , которая входит в состав показателей разрушения  $\Delta q$ ,  $Q_m$  и  $N_p$ . Нашими исследованиями установлена зависимость  $\Delta q$  от  $v_n$  для алмазного диска при резании горных пород контактной прочностью:

$$P_n = 100 \cdot 10^7, \text{ Н/м}^2,$$

$$\Delta q_{100} = \left( 76 + \frac{900}{v_n} + 0,208v_n \right) b l_n, \text{ кар/м}^2; \quad (136)$$

$$P_n = 200 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2,$$

$$\Delta q_{200} = \left( 326 + \frac{600}{v_n} + 0,29v_n \right) b l_n, \text{ кар/м}^2; \quad (137)$$

$$P_n = 300 \cdot 10^7, \text{ Н/м}^2,$$

$$\Delta q_{300} = \left( 605 + \frac{300}{v_n} + 0,38v_n \right) b l_n, \text{ кар/м}^2. \quad (138)$$

В формулах (136)–(138) скорость подачи имеет размерность м/с, а, как было показано в предыдущих главах,  $l_k$  рассчитывается по формуле (при  $H \leq R$ )

$$l_k = R \arccos \left( \frac{R-H}{R} \right), \text{ м.}$$

Применительно к полосовым пилам воспользуемся зависимостью, предложенной К. С. Варданяном [6], изменив численные коэффициенты в соответствии с размерностью  $v_n$  (м/ч): для мрамора

$$\Delta q = 0,042 + \frac{0,032}{v_n} + 0,32v_n, \text{ кар/м}^2; \quad (139)$$

для базальта

$$\Delta q = 0,116 + \frac{0,018}{v_n} + 0,53v_n, \text{ кар/м}^2; \quad (140)$$

для янцевского гранита

$$\Delta q = 0,763 + \frac{0,007}{v_n} + 13,9v_n, \text{ кар/м}^2. \quad (141)$$

Следует отметить, что контактная прочность для мрамора составляет примерно  $100 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, для базальта —  $150 \times 10^7$  Н/м<sup>2</sup> и для янцевского гранита —  $410 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>. Поэтому при расчете  $S_n$  для штрипсового инструмента необходимо использовать эти значения  $P_k$ .

Для импрегнированных буровых коронок функциональная зависимость между  $\Delta q$  и  $v_n$  для различных значений  $P_k$  не установлена, но в литературе [13, 23, 30, 32] имеется достаточно экспериментальных данных, позволяющих производить расчеты значений  $S_n$ .

Мощности разрушения рассчитываются для каждого типа инструмента по формулам, приведенным в предыдущей главе. Часовая производительность  $Q_m$  для режущего диска, полосовой пилы и буровой коронки определяется соответственно как  $v_n H$ ,  $v_n l_0$ ,  $v_n$  или  $2\pi R_n v_n$ .

Результаты расчетов приведены в виде графиков (рис. 87). Все графические зависимости условных удельных затрат от скорости подачи  $S_n = f(v_n)$  качественно аналогичны зависимости удельных энергозатрат от скорости подачи  $H_w = f(v_n)$ . Как для одной, так и для другой функции имеет место минимум. Зависимости (рис. 87, в), полученные при разрушении пород  $P_k = (100 \div 150) \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, не имеют минимума, но логично предположить, что при дальнейшем увеличении скорости подачи минимум будет иметь место. Анализ формул (121), (135) и соответствующих графических зависимостей показывает, что уменьшение условных удельных затрат обусловлено быстрым снижением издержек по зарплате. При бурении (рис. 87, а) со скоростью подачи 0,25 м/ч пород с  $P_k = 200 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> (кривая 2) затраты по зарплате от  $S_n$  составляют 80%, а при  $v_n = 2$  м/ч — 6%. При разрушении пород диском и полосовой пилой снижение доли издержек по зарплате еще больше.

Увеличение условных удельных затрат с увеличением скорости подачи в основном обусловлено ростом удельного износа

$\Delta q$ . Влияние затрат на электроэнергию мало, и находится в пределах 0,2—10%. Большой процент затрат на электроэнергию соответствует минимальным значениям  $S_n$  при разрушении крепких горных пород с  $P_n = (300 \div 400) \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ .

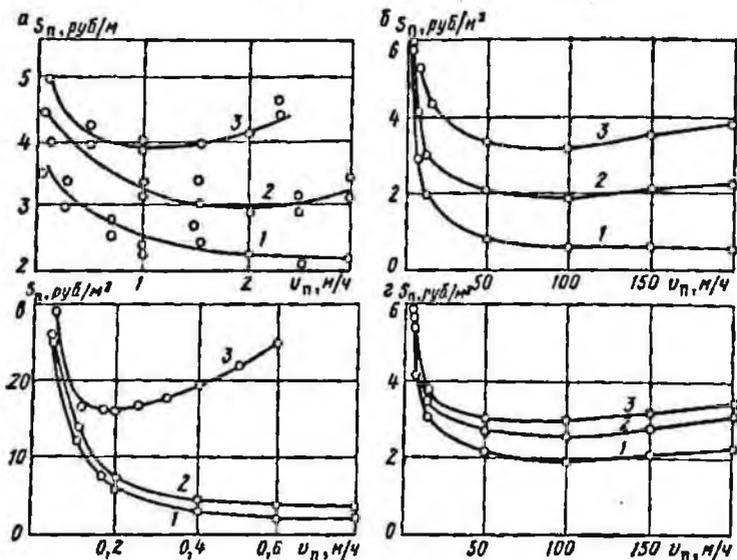


Рис. 87. Зависимости (1—3) условных удельных затрат на разрушение  $S_n$  от скорости подачи  $v_n$  соответственно: а, б — при  $P_n = 100 \cdot 10^7$ ,  $200 \cdot 10^7$  и  $300 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ ; в — при  $P_n = 100 \cdot 10^7$ ,  $150 \cdot 10^7$  и  $410 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ ; г — при глубине резания 0,1; 0,2 и 0,25 м

Для всех изученных типов алмазного инструмента четко просматривается закономерность: разрушению пород большей прочности соответствует меньшее значение скорости подачи, для которой условные удельные затраты минимальны. Так, для буровой коронки (см. рис. 87, а) при бурении пород с контактной прочностью  $100 \cdot 10^7$ ,  $200 \cdot 10^7$  и  $300 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$  скорость подачи при минимальных  $S_n$  соответственно равна 3, 2 и 1 м/ч, для режущего диска (см. рис. 87, б) — 250, 80 и 60 м/ч; для полосовой пилы (см. рис. 87, в), разрушающей мрамор и помбакский базальт, скорость подачи, при которой  $S_n$  минимальна, не менее 0,8 м/ч, а при разрушении янцевского гранита — 0,15 м/ч. Такая же закономерность установлена нами при исследовании энергетических показателей разрушения и геометрии рабочей поверхности. Однако расчеты по формулам рациональной скорости подачи дают существенно меньшие значения  $v_n$ , чем определяемые по минимуму  $S_n$ . Так, для буровой коронки при разрушении соответствующих горных пород рациональная скорость подачи составила 3; 1,56 и 0,9 м/ч, для режущего диска — 67, 35 и 21 м/ч, для полосовой пилы — 0,51; 0,38 и 0,096 м/ч.

Объясняется эта особенность экономической целесообразностью снижать износостойкость инструмента за счет повышения производительности и, тем самым, уменьшения издержек на зарплату. Следовательно, если мы не имеем ограничений по стойкости инструмента и энергетическим показателям, оптимальной скоростью подачи является скорость, при которой условные удельные затраты на разрушение минимальны.

На рис. 87, 2, представлены зависимости  $S_{\Pi}=f(v_{\Pi})$  разрушения породы ( $P_{\kappa}=200 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>) алмазным режущим диском при различной глубине резания  $H$ . Кривым 1, 2 и 3 соответствует  $H=0,1$ ; 0,2 и 0,25 м. Из рисунка видно, что с увеличением глубины резания  $S_{\Pi}$  возрастает примерно пропорционально глубине. Ранее нами было установлено, что наименьшие удельные энергозатраты имеют место тогда, когда заглабление режущего диска наибольшее. Но меньшие условные удельные затраты получаются при снижении глубины резания. Это объясняется тем, что с увеличением глубины резания удельный износ возрастает интенсивнее, чем производительность. При распиловке полосовыми пилами блоков породы большей длины величина  $S_{\Pi}$  снижается, так как  $l_b$  влияет только на издержки по зарплате.

В целом зависимости, представленные на рис. 87, показывают, что наименьшее значение  $S_{\Pi}$  свойственно режущему диску. Производительность полосовых пил может быть повышена за счет большей длины обрабатываемого блока породы. Скорости подачи для полосовых пил при разрушении мрамора или базальта на практике в 2—3 раза меньше. Разрушающая способность инструмента и экономическая целесообразность позволяют поднять производительность современных штрипсовых машин примерно в 2 раза, но низкая жесткость инструмента и исполнительного органа ограничивает производительность. С помощью целевой функции можно определять оптимальные режимы работы исполнительных органов, анализировать структуру и динамику затрат на разрушение и для других типов инструмента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алмазное бурение*/ Н. И. Андрианов, Е. С. Бубнов, М. А. Гисвушев и др., М., Госгортехиздат, 1961.
2. *Алмазно-планетарный бур*/ С. И. Игнатов, В. Ф. Атаманов, В. А. Сагинов и др. — В кн.: Механизация очистных и подготовительных работ. Ч. 1, Караганда, изд. КПТИ, 1969, с. 173—177.
3. *Астахов А. С.* Динамические методы оценки эффективности горного производства. М., Недра, 1973.
4. *Бакуль В. Н., Бугаев А. А.* Применение славутича в геологоразведочных алмазных коронках. — Синтетические алмазы, вып. 4, 1972, с. 42—44.
5. *Барон Л. И., Логунцов Б. М., Позин Е. Э.* Определение свойств горных пород. М., Госгортехиздат, 1962, 321 с.
6. *Варданян К. С.* Современные камнеобрабатывающие станки и поточные линии. Ереван, Айястап, 1975.
7. *Василевский В. В.* Резание природного камня алмазными отрезными кругами. М., изд. ВНИИАлмаз, 1963.
8. *Василевский В. В.* Алмазный инструмент для резания горных пород. — В кн.: Разрушение горных пород механическими способами. М., Наука, 1966, с. 160—167.
9. *Виленский М. И.* О критериях оценки экономической эффективности новой техники. — Вопросы экономики, 1974, № 10, с. 21—24.
10. *Вовчановский И. Ф., Бугаев А. А., Финкельштейн Е. М.* Определение рациональных параметров алмазных коронок для бурения в условиях Донбасса. — В кн.: Горный породоразрушающий инструмент. Киев, Техника, 1969, с. 69—72.
11. *Захарин А. Г.* Методы экономического сравнения вариантов в энергетике по принципу минимума приведенных затрат. М., Недра, 1971.
12. *Захаров К. Н.* К исследованию основных показателей эффективности резания горных пород алмазными штрипсами. — В кн.: Алмазы и технический прогресс. М., изд. ВНИИАлмаз, 1973, с. 12—14.
13. *Исаев М. И., Пономарев П. В.* Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. М., Недра, 1965, 321 с.
14. *Исследование прогресса резания карагандинских песчаников дисками, армированными импрегнированными алмазными сегментами*/ А. Ф. Кичигин, С. И. Игнатов, Ю. И. Климов и др. — В кн.: Разрушение горных пород механическими способами. М., Наука, 1966, с. 153—160.
15. *Карюк Г. Г., Александров В. А., Кацалуха С. А.* Исследование рабочей поверхности алмазносного слоя дисковых камнерезных пил. — В кн.: Горный породоразрушающий инструмент, Киев, Техника, 1970, с. 48—53.
16. *Кичигин А. Ф., Игнатов С. И., Захаров К. Н.* Влияние микротвердости и агрегатной прочности горных пород на самозатачивание алмазных штрипсовых пил. — Изв. ВУЗов. Горный журнал, 1973: № 6, с. 76—80.

17. Кичигин А. Ф., Климов Ю. И., Игнатов С. Н. Алмазный инструмент в породопроходческих комбайнах. — В кн.: Синтетические алмазы в промышленности. Киев, Наукова думка, 1974, с. 317—322.
18. Кичигин А. Ф., Климов Ю. И., Игнатов С. Н. Особенности работы алмазного инструмента при резании горных пород. — Изв. ВУЗов. Горный журнал, 1968, № 2, с. 76—80.
19. Климов Ю. И. Вопросы создания и исследование нового алмазного режущего инструмента для породопроходческих комбайнов. — Синтетические алмазы — ключ к техническому прогрессу. Ч. 2. Киев, Наукова думка, 1977, с. 215—222.
20. Климов Ю. И., Игнатов С. Н., Черкашин Ю. А. Изыскание конструкции и технологии изготовления алмазного породоразрушающего инструмента. — Горное дело. Вып. 2, Караганда, 1974, с. 82—89.
21. Крагельский И. В., Виноградов И. З. Коэффициенты трения. Изд. АН СССР, М., 1961.
22. Малышев П. А., Шилин И. Г. Критерии эффективности социалистического воспроизводства. М., Мысль, 1973.
23. Марамзин А. В., Блинов Г. А. Алмазное бурение на твердые полезные ископаемые. Л., Недра, 1977.
24. Маркман Л. Д., Фераниди К. И. Механические свойства и сопротивление горных пород бурению—резанию. — Вопросы механизации в горной промышленности. Вып. 27. М., Недра, 1969, с. 19—33.
25. Механизм разрушения и исследования сил при резании песчаников единичным алмазным зерном. /А. Ф. Кичигин, Ю. И. Климов, С. Н. Игнатов и др. — В кн.: Бурение шпуров и скважин. Фрунзе, Илим, 1968, с. 112—122.
26. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом. /А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, А. Г. Лазуткин и др. М., Недра, 1972.
27. Научные основы и перспективы создания проходческих комплексов на базе проходческих комбайнов с дисковыми исполнительными органами. /Г. П. Половнев, И. А. Эйдельштейн, В. А. Бреннер и др. — В кн.: Комплексная механизация и автоматизация подземной добычи угля. М., изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1975, с. 51—55.
28. Об оптимальном соотношении между скоростями подачи и резания при разрушении песчаника алмазным диском. /А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, Ю. И. Климов и др. — Изв. ВУЗов. Горный журнал, 1969, № 4, с. 101—103.
29. Отраслевая методика определения экономической эффективности новой техники и совершенствования производства в угольной промышленности. М., изд. ЦНИЭИУголь, 1973.
30. Породоразрушающий инструмент для алмазного бурения /Г. А. Блинов, А. Л. Николас, Ю. А. Оношко и др. Л., Недра, 1969.
31. Потарь Н. В. Алмазные коронки для сверления железобетона. — В кн.: Горный породоразрушающий инструмент, Киев, Техника, 1969, с. 54—55.
32. Работоспособность алмазного инструмента и рациональные области его применения /Г. А. Блинов, Н. И. Корнилов, О. С. Головин и др. М., изд. ВИЭМС, 1972.
33. Русаков К. И., Сычев Ю. И. Алмазный инструмент для строительных и дорожных машин. М., НИИИформдоркоммунмаш, 1965.

34. Сагинов А. С., Ярема В. Д., Шипицын А. К. Пути повышения эффективности буровзрывных работ в породных подготовительных выработках Карагайдинского бассейна. — В кн.: Механизация очистных и подготовительных работ. Ч. 1, Караганда, 1969, с. 3—14.

35. Царицын В. В. Алмазное бурение. М., Недра, 1975.

36. Шахтные испытания экспериментального проходческого комбайна с алмазным диском и гидравлическим отрывником / В. Д. Ярема, Ю. И. Климов, В. Ф. Атаманов и др. — В кн.: Совершенствование методов разработки и создание средств комплексной механизации выемки угольных пластов, Караганда, 1972, с. 148—150.

37. Эглем П. Высокая скорость резания гранита алмазными дисками и ее влияние на экономичность распиловки. — В кн.: Синтетические алмазы в промышленности. Киев, Наукова думка, 1974, с. 301—304.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Глава 1. Назначение и область применения алмазного инструмента . . . . .	5
§ 1. Конструктивные особенности . . . . .	5
§ 2. Схемы обработки и разрушения породного массива . . . . .	18
Глава 2. Режимы работы инструмента . . . . .	35
§ 1. Геометрия рабочей поверхности и параметры разрушения . . . . .	35
§ 2. Скорость подачи . . . . .	43
§ 3. Производительность . . . . .	50
Глава 3. Силовые и энергетические показатели разрушения . . . . .	60
§ 1. Мощность, силы резания и подачи . . . . .	60
§ 2. Резание горных пород единичным алмазным зерном . . . . .	76
§ 3. Конструктивные и геометрические параметры . . . . .	84
§ 4. Режимы разрушения . . . . .	89
§ 5. Расчет мощности и силы подачи . . . . .	103
Глава 4. Алмазный инструмент в исполнительных органах горных машин . . . . .	122
§ 1. Исполнительные органы для проведения подготовительных горных выработок . . . . .	122
§ 2. Исполнительные органы для бурения шпуров и скважин . . . . .	138
§ 3. Эффективность применения алмазного инструмента . . . . .	144
Список литературы . . . . .	156

АНАТОЛИЙ ФИЛИППОВИЧ КИЧИНГИН  
СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ИГНАТОВ  
ЮРИЙ ИВАНОВИЧ КЛИМОВ  
ВЛАДИМИР ДЕМЬЯНОВИЧ ЯРЕМА

**АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ  
ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ КРЕПКИХ  
ГОРНЫХ ПОРОД**

Редактор издательства *О. Н. Кожина*, Обложка художника *Т. Н. Погореловой*  
Художественный редактор *О. Н. Зийцева*. Технические редакторы *Н. С. Гришанова*,  
*А. Г. Иванова*  
Корректор *Т. М. Столярова*

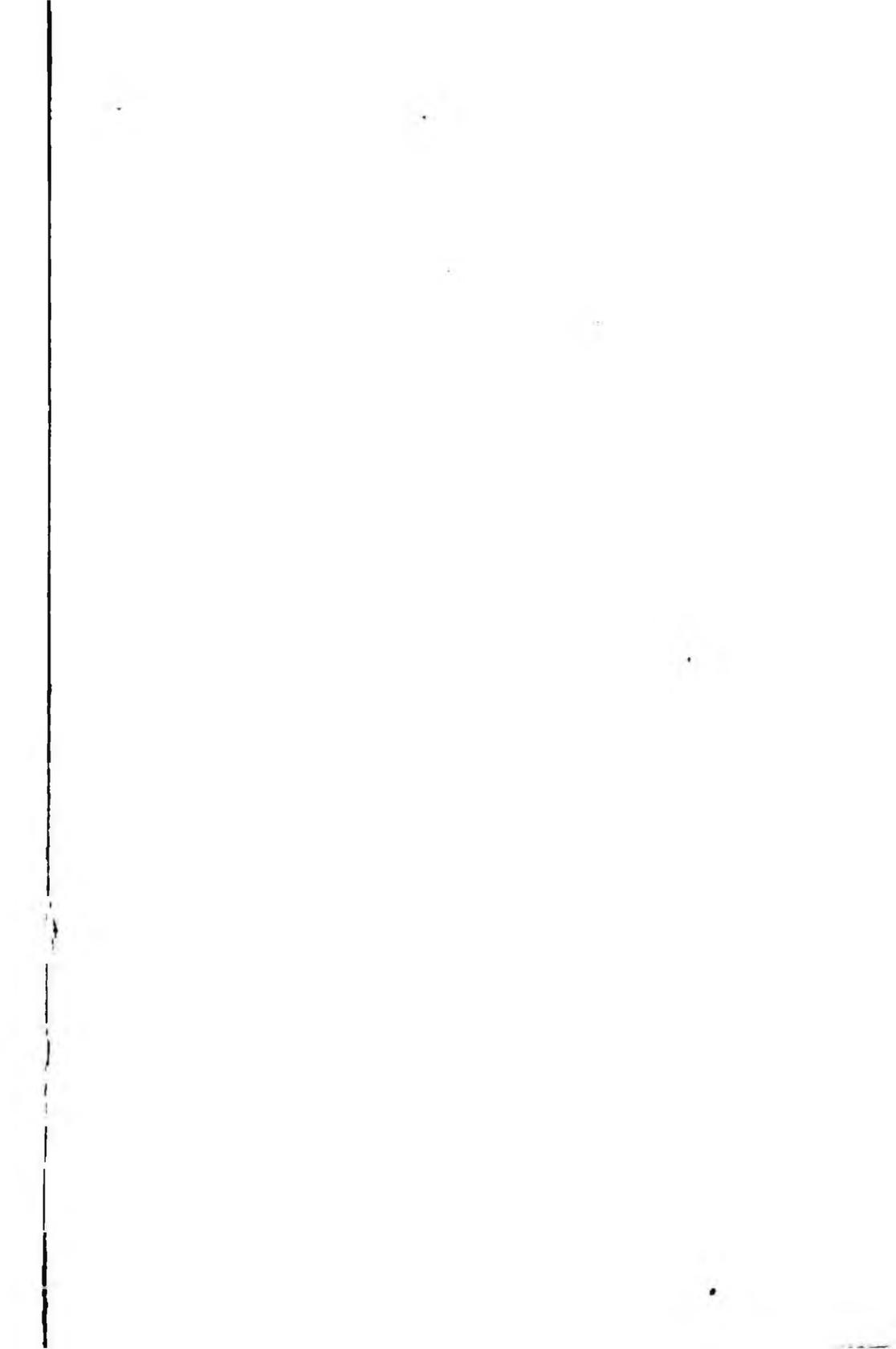
ИБ № 2619

---

Сдано в набор 12.11.79. Подписано в печать 20.05.80. Т-10037. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Типографская бумага № 1. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 10,0  
Уч.-изд. л. 10,15. Тираж 1780 экз. Заказ 917/7155-12. Цена 55 коп.

---

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.  
Московская типография № 6 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.



• НЕДРА •