622.24
Ш 26

А. А ПЕРЕГУДОВ, М. Г. АБРАМСОН, А. В. АНДРЕЕВ, Н. Г. ДЮКОВ

ШАРОШЕЧНЫЕ ДОЛОТА ДЛЯ БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН

Книга должна быть возвращена не позже указанного здесь срока

Количество предыдущих выдач

25.07.02-528

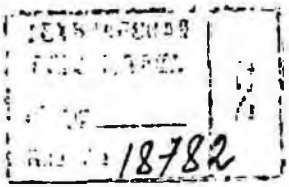
2005—1967

24 18782.
26. Шарошк
е золота для
ения взрыв
ых скважин.
р-90.
04.07

622.24
Ш26

А. А. ПЕРЕГУДОВ, М. Г. АБРАМСОН,
А. В. АНДРЕЕВ, Н. Г. ДЮКОВ

ШАРОШЕЧНЫЕ ДОЛОТА ДЛЯ БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва, 1969

УДК 622.233.3.053:622.235

Шарошечные долота для бурения взрывных скважин

А. А. Перегудов, М. Г. Абрамсон, А. В. Андреев, Н. Г. Дюков

Издательство «Недра», 1969

В книге изложен отечественный опыт бурения взрывных скважин на открытых и подземных горных работах с применением шарошечных долот, описаны существующие технические средства бурения (шарошечные долота, буровые станки), указаны горногеологические условия ряда крупнейших горных предприятий страны, разрабатывающих месторождения полезных ископаемых открытым и подземным способами, приведены технико-экономические показатели бурения взрывных скважин различными способами.

Особое внимание уделено вопросам технологии бурения и правилам технической эксплуатации шарошечных долот при бурении взрывных скважин в горной промышленности.

В книге также приведены краткие сведения о шарошечных долотах и буровых станках, применяемых в зарубежных странах. Таблиц — 53, иллюстраций — 71, библиография — 65 названий.

Главы I, II, III, V, VI, VII, VIII и IX написаны совместно М. Г. Абрамсоном, А. А. Перегудовым и Н. Г. Дюковым, глава VI написана А. В. Андреевым.

3-7-3
369-68

Глава I

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГОРНЫХ ПОРОДАХ, РАЗБУРИВАЕМЫХ НА ОТКРЫТЫХ И ПОДЗЕМНЫХ РАБОТАХ

Ни одна из известных в настоящее время классификаций горных пород не учитывает всего многообразия свойств горных пород, не характеризует их буримость при применении шарошечных долот, а корреляционные связи между различными классификациями не установлены или весьма относительны.

В связи с этим в настоящей книге для характеристики свойств буримых пород используется классификация горных пород, разработанная проф. М. М. Протодьяконовым (табл. 1) и получившая наиболее широкое распространение в горной промышленности (хотя она и недостаточна для характеристики горных пород по буримости).

В табл. 2 приведены некоторые характеристики горных пород ряда крупнейших подземных рудников СССР [3], ведущих отбойку полезных ископаемых с применением взрывных скважин.

Так, если на медных и других рудниках добываются руды преимущественно средней крепости с коэффициентом 8 ÷ 12 по шкале проф. М. М. Протодьяконова и мягкие (СУБР, комбинат «Апатит»), то полиметаллические рудники разрабатывают главным образом месторождения с крепкими и весьма крепкими рудами и вмещающими породами, а рудники черной металлургии наряду с рудами крепкими и весьма крепкими (КМА) разрабатывают руды мягкие (рудоуправление им. Дзержинского треста Дзержинскруда, Кривой Рог) и средней крепости (Высокогорский и Гороблагодатский рудники).

Таким образом, наиболее характерными породами, встречающимися при подземной разработке рудных месторождений, являются породы от средней крепости до весьма крепких. Это, как правило, породы вышесредней и повышенной абразивности (по классификации проф. Л. И. Барона) с коэффициентом крепости $f = 8 \div 14$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова.

В табл. 3 приведены некоторые характеристики горных пород ряда крупнейших карьеров СССР.

Таблица 1

Категория	Степень крепости породы	Горные породы	Коэффициент крепости
I	В высшей степени крепкие	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты. Исключительные по крепости породы	20
II	Очень крепкие породы	Очень крепкие гранатовые породы, кварцевый порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец, менее крепкие, нежели указанные выше, кварциты, самые крепкие песчаники и известняки, очень крепкие железные руды	15
III	Крепкие породы	Гранит (плотный) и гранитные породы, очень крепкие песчаники и известняки, кварцевые рудные жилы, крепкий конгломерат, крепкие кварцы, крепкие железные руды	10
IIIa	То же	Известняки (крепкие), некрепкий гранит, крепкие песчаники, крепкий мрамор, доломит, колчеданы	8
IV	Довольно крепкие породы	Кварцит с трещинами, обыкновенный песчаник, железные руды (средней крепости)	6
IVa	То же	Песчанистые сланцы, сланцевые песчаники	5
V	Средние	Крепкий глинистый сланец, некрепкий песчаник и известняк, мягкий конгломерат	4
Va	»	Разнообразные сланцы (некрепкие), плотный мергель, трещиноватый и расщепленный кварцит, некрепкие железные руды	3
VI	Довольно мягкие породы	Мягкий сланец, очень мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс, меркий грунт, антрацит, обыкновенный мергель, разрушенный песчаник, сцементированная галька и каменистый грунт	2
VIa	То же	Щебенистый грунт, разрушенный сланец, слежавшаяся галька и щебень, крепкий каменный уголь, отвердевшая глина, слабый кварцит, мягкая мокрая железная руда	1,5
VII	Мягкие	Глины (плотные), мягкий каменный уголь, крепкий нанос — глинистый грунт	1,0
VIIa	»	Мягкая песчаная глина, лёсс, очень слабый кварцит, мягкая сухая железная руда	0,8
VIII	Землистые породы	Растительная земля, торф, легкий суглинок, сырой песок	0,6
IX	Сыпучие породы	Песок, осыпи, мягкий гравий, насыпанная земля, добытый уголь	0,5
X	Плывучие породы	Плывуны, болотистый грунт, разжиженный лёсс и другие разжиженные грунты	0,2

Таблица 2

Рудники	Крепость буримых пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова и их содержание, %	Минералогический состав и объемный вес руды, $T/м^3$	Характер залегания рудного тела	Угол падения рудного тела, *град*
Медный рудник имени III Интернационала	Руды 5÷8. Породы 11÷15	Колчеданные руды (пирит, сфалерит, халькопирит), $\gamma = 4,0 \div 4,1$	Линзы неправильной формы	$\alpha = 45 \div 75$
Джезказганский	Руды 6÷8—65÷75%. Породы 10÷12—35÷25%	Халькопирит, борнит, халькозин, $\gamma = 2,6$	Пластовая залежь	$\alpha = 5 \div 8$
Дегтярский медный рудник	Руды 8—12. Породы 12—18	Колчедан, $\gamma = 4,0$	Жилы линзообразные с раздувами и пережимами	$\alpha = 65 \div 75$
Рудники комбината «Апатит»	Руды 6÷8—70%. Породы 10÷12—30%	Апатитонефелиновые руды: апатит 46%, нефелин 40%, $\gamma = 3,0$	Линзообразные залежи	$\alpha = 30 \div 35$
Дарасунское рудоуправление	10—40%; 15—50%; 20—10%	Кварц 30—40%, сульфиды 60—70%, $\gamma = 3,2 \div 3,5$	Жила мощностью 0,3—1,2 *м*	$\alpha = 60 \div 90$
Северо-Уральские бокситовые рудники (СУБР)	4—65%, 5—26%, 6—6,5%, 8÷10—1,5%	Диаспоры 40%, окислы железа 26%, кварц 30%, $\gamma = 2,7$	Пластообразные залежи	$\alpha = 20 \div 30$
«Молибден» Тырны-Аузского комбината	Породы 14—18	Пироксен 60%, гранат 20%, кварц 10%, $\gamma = 3$	Седловидная залежь	$\alpha = 70 \div 90$
Салаирское рудоуправление	10—14, преимущественно 12	Кварцит 30—40%, барит 20—40%, кальцит 10—30%, $\gamma = 3 \div 4$	Линзообразные рудные тела	$\alpha = 40 \div 60$
Алтын-Топканский рудник (подземный) Алтын-Топканского свинцово-цинкового комбината	12÷14—10%	Кварцит, ортоклаз, плагиоклаз, кальцит, $\gamma = 2,8 \div 3,4$	Линзообразная залежь	—
Миргалимсайский	Руды 4÷12. Породы 8÷12	Галенит, пирит, сфалерит, $\gamma = 2,5 \div 3,0$	Пластообразная залежь	—
Рудник им. XXII съезда КПСС Зыряновского комбината	14÷16	Галенит, халькопирит, кварц, $\gamma = 2,6 \div 2,8$	Неправильной формы	—
Лениногорский	5÷6—2%, 12—8%, 14—78%, 16—12%	Сфалерит, галенит, пирит, халькопирит, $\gamma = 2,8 \div 2,9$	Линзообразная или пластообразная залежь	—

Продолжение таблицы 2

Рудники	Крепость буримых пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова и их содержание, %	Минералогический состав и объемный вес руды, $T/м^3$	Характер залегания рудного тела	Угол падения рудного тела, *град*
Рудник им. 40-летия ВЛКСМ	8÷10—15%, 12÷14—25%, 14÷16—60%	Микрокварциты с прожилками кварца, $\gamma = 2{,}8 \div 3{,}4$	Линзообразные рудные тела	• —
Рудник «Верхний» комбината «Сихали»	10÷12—50%, 12÷14—50%	Известняки 50%, порфириты 50%, $\gamma = 3{,}0$	Трубо- и пластообразная залежь	$\alpha = 30 \div 65$
Рудник «1-й Советский» комбината «Сихали»	10÷12—55%, 12÷16—45%	Известняки 55%, песчаники и порфириты 45%, $\gamma = 3{,}0$	Жилы, трубы, линзы	$\alpha = 50 \div 80$
Рудник «2-й Советский» комбината «Сихали»	10÷12—35%, 12÷16—65%	Известняки 35%, песчаники 65%, $\gamma = 2{,}97$	Линзы, пластообразные залежи	$\alpha = 20 \div 90$
Рудник «Текели» комбината «Текели»	11—62%, 8—15%, 14÷15—23%	Углекислокварцевые сланцы 36%, углекисло-глинистые сланцы 31%, шпат 33%, $\gamma = 2{,}8 \div 3{,}1$	Две пачки с безрудным прослоем	—
Рудник «Кок-су» комбината «Текели»	15—70%, 18—30%	Доломитизированные известняки с сульфидным оруденением, $\gamma = 3{,}08$	Линзообразная залежь	$\alpha = 75 \div 80$
Рудник им. Губкина комбината «Кмаруда»	16—18	Гематит, магнетит 58%, кремнезем 42%, $\gamma = 3{,}4$	Крупный массив кварцитов	$\alpha = 80$
Южно-Коробковский рудник комбината «Кмаруда»	16—18	Гематит, магнезит 58%, кремнезем 42%, $\gamma = 3{,}4$	То же	$\alpha = 80$
Рудоуправление им. Р. Люксембург треста Лениногорскруда	6÷8—35%; 8÷12—55%; 12÷15—10%	Мартитовая руда, $\gamma = 3{,}6 \div 3{,}7$	Столбообразная залежь	$\alpha = 42 \div 60$
Рудоуправление имени Ф. Дзержинского треста Дзержинскруда	2÷3—10%, 4÷6—60%, 6÷8—30%	Мартит, гематит 40%, мартит, гидрогематит 60%, $\gamma = 3{,}4 \div 3{,}7$	Залежь пластового типа	$\alpha = 42 \div 60$
Шахта «Магнетитовая» Высокогорского железного рудника	8—0,3%, 10—93,4%, 11—5,0%, 12÷13—1,3%	Магнетит 80—85%, гематит, шпаты, халькопирит и др., $\gamma = 3{,}5 \div 3{,}7$	Пластообразные залежи различной мощности	$\alpha = 50 \div 70$
Гороблагодатский железный рудник	8—12	Магнетит, шпат, кальцит, гранат и др.,	Вытянутые пластообразные рудные тела	$\alpha = 38 \div 45$

Таблица 3

Карьеры	Крепость буримых пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова	Горные породы и руды, объемный вес, $T/м^3$
1	2	3
Коунрадский рудник Балхашского комбината	Породы и руды 6 ÷ 12	Гранодиорит-порфиры, вторичные кварциты со слабой окварцованностью, $\gamma = 2,6$
Карьеры Северо-Джезказганского рудоуправления Джезказганского горнометаллургического комбината	Песчаники 8 ÷ 16, руды 6 ÷ 14	Сульфидные руды, песчаники, $\gamma = 2,7$
Андреевский карьер Лениногорского полиметаллического комбината	Породы 10 ÷ 14, руды 12 ÷ 18	Известково-глинистые сланцы, туфы, серицитовые сланцы, микрокварциты, $\gamma = 2,8 \div 3,0$
Центральный и Западный карьеры Алтын-Тюбинского (открытого) рудника Алтын-Тюбинского свинцово-цинкового комбината	Породы 10 ÷ 14, руды 12 ÷ 18	Гранодиориты, гранодиорит-порфиры, скарны, известняки, $\gamma = 2,8 \div 3,4$
Кургашинканский рудник Алтын-Тюбинского свинцово-цинкового комбината	Породы и руды 8 ÷ 12	Известняки, сиениты, диориты, $\gamma = 2,2 \div 2,8$
Кальмакырский рудник Алтын-Тюбинского свинцово-цинкового комбината	Породы и руды 8 ÷ 14	Сиениты, гранодиорит-порфиры, вторичные кварциты, известняки, сланцы, $\gamma = 2,5 \div 2,7$
Сибайские карьеры	Породы 6 ÷ 12, руды 8 ÷ 14	Кварцевые альбитофиры, сиениты, медноколчеданово-вые руды, $\gamma = 3,7$
Блявинский карьер	Породы и руды 6 ÷ 18	Кварцевые кератофиры, туфы, диабазы, медноколчеданные руды, сиениты, $\gamma = 2,8 \div 3,5$
Карьеры Уфалейского никелевого завода	Породы и руды 2 ÷ 6	Мрамор, серпентиниты, $\gamma = 2,8 \div 3,0$
Буурдинский карьер	Породы и руды 8 ÷ 12	Кварцевые и дацитовые порфиры, граниты, $\gamma = 3,2$
Бурибайский карьер	Породы 6 ÷ 8, руды 6 ÷ 10	Сиениты, габбро-диабазы, кварцевые альбитофиры, медноколчеданные руды, $\gamma = 3,7$
Учалинский карьер	Породы и руды 8 ÷ 12	Медноколчеданные руды, габбро-диабазы, $\gamma = 4,3$
Карьеры Медвежий ручей и Угольный ручей Норильского горнометаллургического комбината	Породы и руды 8 ÷ 16	Габбро-диабазы, габбро-диориты, диабазы, $\gamma = 3,8 \div 4,1$
Карьер Ждановского ГОК	Породы и руды 12 ÷ 16	Габбро, перидотиты, филлиты, $\gamma = 3,8 \div 4,1$

Продолжение таблицы 3

Карьеры	Крепость буримых пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова	Горные породы и руды, объемный вес, Т/м³
1	2	3
Карьеры Гайского ГОК № 1 и № 2	Породы и руды 8 ÷ 16	Медноколчеданные руды, диабазы, порфириты, альбитофиры, $\gamma = 4,3$
Рудник «Железный» Ковродского ГОК	Породы и руды 10 ÷ 12	Железные и безрудные кварциты, амфиболиты, гранито-гнейсы, $\gamma = 3,3$
Рудник Оленегорского ГОК	Породы и руды 8 ÷ 16	Железистые и безрудные кварциты, гранито-гнейсы, пегматиты, амфиболиты $\gamma = 3,3$
Магнитогорский рудник Магнитогорского металлургического комбината	Породы и руды 6 ÷ 12	Магнетитовые и мартитовые руды, граниты, порфириты, мрамор, скарны, $\gamma = 2,9 \div 3,0$
Соколовский рудник Соколовско-Сарбайского ГОК	Породы и руды 8 ÷ 14	
Сарбайский рудник Соколовско-Сарбайского ГОК	Породы и руды 6 ÷ 14	
Карьер Криворожского Центрального ГОК	Породы и руды 8 ÷ 14	
Карьер № 1 Михайловского железорудного комбината	Породы и руды 6 ÷ 14	Мартитовые и гидрогематито-мартитовые руды, железистые кварциты
Центральный, Александровский и Валуевский карьеры Гороблагодатского рудоуправления	Породы и руды 8 ÷ 12	
Карьер СевГОК	Породы и руды 8 ÷ 14	Железистые кварциты, магнетитовые роговики, $\gamma = 3,5$
Карьер Ново-Криворожского ГОК	Породы и руды 8 ÷ 14	Железистые кварциты, $\gamma = 3,5$
Карьер ЮГОК	Породы и руды 10 ÷ 18	Железистые кварциты, неокисленные и окисленные, роговики, джеспилиты, $\gamma = 3,5$
Лебединский карьер	Породы и руды 4 ÷ 8	Мартитовые и гидрогематито-мартитовые руды, $\gamma = 2,9 \div 3,0$
Карьеры им. ОГПУ, Иркускан и Кварцитовый Бакальского рудоуправления	Породы 12 ÷ 18, руды 6 ÷ 12	Кварциты, кварцевые песчаники, известково-глинистые сланцы, известняки и доломиты, сидериты
Первоуральский железорудный карьер	Породы и руды 6 ÷ 10	Спилито-горнблендиты, габбро
Юксперский рудник комбината «Апатит»	Породы и руды 8 ÷ 10	Апатито-нефелиновые руды, пегматиты, рисчорриты, $\gamma = 3,0$

Продолжение таблицы 3

Карьеры	Крепость буримых пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова	Горные породы и руды, объемный вес, $T/м^3$
1	2	3
Рудник Расвумчорр-Цирк комбината «Апатит»	Породы и руды 8 ÷ 10	Апатито-нефелиновые руды, рисчорриты, ийолиты, уртиты, пегматиты, $\gamma = 3{,}0$
Рудник им. Кирова комбината «Апатит»	Породы и руды 6 ÷ 10	Апатито-нефелиновые руды, ийолиты, сфен, рисчорриты, уртиты, $\gamma = 3{,}0$
Центральный рудник комбината «Апатит»	Породы и руды 8 ÷ 12	Апатито-нефелиновые руды, рисчорриты, ийолиты, $\gamma = 3{,}0$
Ак-Сайский рудник комбината «Кара-Тау»	Породы и руды 8 ÷ 14	Известняки, доломитизированные и окварцованные известняки, кремни
Центральное рудоуправление комбината «Ураласбест»	8 ÷ 18	Серпентиниты, диориты, перидотиты, $\gamma = 2{,}4 \div 2{,}8$
Северное рудоуправление комбината «Ураласбест»	8 ÷ 18	Диориты, перидотиты, серпентиниты, $\gamma = 2{,}4 \div 28$,
Южное рудоуправление комбината «Ураласбест»	8 ÷ 18	Серпентиниты, диориты, перидотиты, $\gamma = 2{,}4 \div 2{,}8$
Центральный рудник Докучаевского флюсодоломитного комбината	8 ÷ 12	Известняки, доломитизированные известняки, доломиты
Восточный рудник Докучаевского флюсодоломитного комбината	6 ÷ 8	Известняки, доломитизированные известняки
Доломитный рудник Докучаевского флюсодоломитного комбината	8 ÷ 12	Известняки, доломитизированные известняки, доломиты, песчаники
Карьер Каракубского рудоуправления	8 ÷ 10	Известняки, доломитизированные известняки
Кадыковский карьер Балаклавского рудоуправления	6 ÷ 10	Известняки
Балаклавский карьер Балаклавского рудоуправления	8 ÷ 12	Доломитизированные известняки, доломиты
Запорожское карьероуправление	12 ÷ 14	Граниты мелкозернистые
Гиляванский карьер треста Западукрвзрывпром	12 ÷ 14	То же
Новотроицкий рудник	8 ÷ 10	Известняки
Карьер Сорского молибденового комбината	8 ÷ 14	
Зыряновский рудник (открытый) Зыряновского свинцового комбината	12 ÷ 14	Кварцево-хлорито-серицитовые сланцы, порфириты, микрокварциты, окварцованные сланцы с кварцем

Анализируя приведенные в табл. 3 сведения о некоторых характеристиках горных пород и руд, разрабатываемых открытым способом крупнейшими предприятиями СССР, можно заметить, что основной объем пород и руд имеет коэффициент крепости $f = 8 \div 14$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова.

В меньшем объеме разрабатываются породы и руды с коффициентом крепости $f \leqslant 6$. Также относительно невелики объемы пород и руд с коэффициентом крепости $f \geqslant 14 \div 16$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова.

По оценке Института горного дела им. А. А. Скочинского объем разрабатываемых открытым способом горных пород и руд составляет (в %):

с коэффициентом крепости $\leqslant 6$	34
» » » $f = 8 \div 14$	56
» » » $f \geqslant 14 \div 16$	10

Оценивая разрабатываемые открытым способом горные породы и руды с точки зрения их абразивности (по классификации проф. Л. И. Барона), следует отметить, что на открытых горных работах разрабатывается около 30% мало-, нижесредне- и среднеабразивных пород, около 60% пород выше среднеабразивных и повышенной абразивности и около 5% высокоабразивных пород.

Глава II

СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН НА ОТКРЫТЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

§ 1. Состояние техники бурения взрывных скважин на открытых горных работах

Основным и наиболее прогрессивным способом добычи полезных ископаемых является открытая разработка.

В 1965 г. открытым способом добыто 73% железной руды, 61,5% руд цветных металлов, почти 25% угля, около 80% горнохимического сырья, практически все строительные материалы, нерудные полезные ископаемые, флюсовое и огнеупорное сырье.

В последние годы введен в эксплуатацию или реконструирован ряд крупнейших горных предприятий, разрабатывающих месторождения полезных ископаемых открытым способом: горнообогатительные комбинаты в Криворожском бассейне (ЮГОК, КЦГОК, НКГОК, СевГОК, Ингулецкий ГОК) производительностью от 10 до 25 млн. *т* сырой руды в год; Лебединский и Михайловский рудники (Курская магнитная аномалия) общей мощностью 10 млн. *т* сырой руды в год; Соколовско-Сарбайский ГОК мощностью 26,5 млн. *т* сырой руды в год; Качканарский ГОК с проектной производительностью 33 млн. *т* сырой руды в год; Оленегорский и Ковдорский ГОК на Кольском полуострове, Коршуновский железный рудник, карьеры горнохимических комбинатов «Апатит» и «Кара-Тау», рудники Алтын-Топканского свинцово-цинкового, Учалинского, Ждановского комбинатов и др.

В связи с этим развитию и совершенствованию техники и технологии открытой добычи полезных ископаемых придается первостепенное значение.

Буровое оборудование для открытых горных разработок

До последних лет практически единственным способом бурения взрывных скважин на открытых горных разработках в породах с коэффициентом крепости $f \geqslant 4$ являлось ударно-канатное бурение, основанное на разрушении горных пород с помощью периодических

ударов свободно падающего бурового снаряда (массивное долото со штангами), подвешенного на канате.

В 1961 г. в Советском Союзе на карьерах различных отраслей народного хозяйства и при строительстве транспортных и гидротехнических сооружений работало более 1600 станков ударно-канатного бурения, которыми пробурено около 4,3 млн. *м* взрывных скважин со среднемесячной производительностью около 220 *м* на станок.

Производительность ударно-канатного бурения чрезвычайно низка: в породах с $f = 6—10$ она составляет 8—14 *м* в смену, снижаясь до 2—5 *м* в смену при бурении в породах с $f > 14$.

Одним из путей повышения производительности ударно-канатного бурения являлось увеличение веса бурового снаряда с одновременным увеличением диаметра долота.

В ряде случаев это позволило несколько повысить (на 10—15%) производительность ударно-канатного бурения, однако не явилось мероприятием, позволяющим обеспечить резкое увеличение производительности буровых работ.

Производительность ударно-канатного бурения по-прежнему повсеместно оставалась на одном и том же уровне, что свидетельствовало об отсутствии каких-либо резервов дальнейшего увеличения производительности этого способа бурения (табл. 4).

Таблица 4

Рудник	Среднесменная производительность ударно-канатного бурения, *м*									
	1955 г.	1956 г.	1957 г.	1958 г.	1959 г.	1960 г.	1961 г	1962 г.	1963 г.	1964 г.
ЮГОК . .	—	—	—	—	8.1	8.0	8.01	8.2	8.8	9.9
Коуприд-ский . .	11.8	11.9	12.1	15.3	12.0	14.0	14.0	14.1	13.2	13.9
Курганин-канский	11.4	12.5	15.6	12.0	14.0	14.0	14.1	13.8	14.0	14.5
Ураласбест	12.0	12.5	12.8	12.0	11.5	12.5	12.3	11.7	10.0	9.0

Отсутствие резервов увеличения показателей ударно-канатного бурения поставило вопрос о необходимости проведения комплекса научно-исследовательских, поисковых и экспериментальных работ по изысканию и разработке новых способов и технических средств для бурения взрывных скважин на открытых горных работах.

В Советском Союзе и за рубежом при бурении нефтяных и газовых скважин в течение нескольких десятилетий широко применяются шарошечные долота. Удельный вес бурения шарошечными долотами нефтяных и газовых скважин превышает 90%.

Зарубежная техническая литература свидетельствовала также о том, что уже в первые послевоенные годы в США ряд фирм начал проводить экспериментальные работы по созданию буровых станков для бурения взрывных скважин на карьерах с помощью шарошечных долот.

В начале и середине 50-х годов фирмы «Джой», «Бюсайрус-Ирп», «Чикаго-Пневматик» (США) и другие разработали и выпустили несколько моделей буровых станков для проходки взрывных скважин на открытых горных работах, а фирмы «Юз Тул Ко», «Секьюрити» (США) и другие начали производить шарошечные долота специально для горнодобывающей промышленности.

В табл. 5 приведены технические характеристики буровых станков различных фирм, предназначенных для бурения взрывных скважин на открытых горных работах с помощью шарошечных долот. В табл. 5 включены технические характеристики и более поздних моделей буровых станков.

В настоящее время в США ряд фирм изготовляет более 30 моделей буровых станков различных типоразмеров, предназначенных для бурения взрывных скважин шарошечными долотами диаметром от 100 до 380 *мм*.

Бурение взрывных скважин шарошечными долотами на карьерах зарубежных стран (США, Канада) в настоящее время широко распространено, однако имеющиеся в зарубежной технической литературе сведения носят отрывочный характер, что не позволяет дать количественную оценку удельного веса этого способа бурения, но позволяет полагать, что бурение шарошечными долотами в настоящее время является одним из основных способов бурения взрывных скважин на карьерах США, Канады и других стран.

Для бурения взрывных скважин на открытых горных работах ряд зарубежных фирм изготовляет несколько типов шарошечных долот различных модификаций диаметром от 142 до 380 *мм*.

Наряду с бурением шарошечными долотами на зарубежных карьерах применяются станки с погружными пневмоударниками и огневого бурения. Как правило, эти станки используются при бурении в весьма крепких абразивных породах с высоким содержанием кварца, а также на карьерах малой производительности (пневмоударные станки), на которых из-за ограниченного фронта работ применение высокопроизводительных станков для бурения шарошечными долотами экономически не оправдано.

Наиболее распространены за рубежом пневмоударные станки «Дриллмастер» фирмы «Ингерсолл-Рэнд» (США), смонтированные на гусеничных тракторах «Катерпиллер». Техническая характеристика станка «Дриллмастер» приведена в табл. 5.

В Советском Союзе в конце 50-х годов начались поисковые и экспериментальные работы по бурению взрывных скважин с помощью шарошечных долот на открытых разработках.

В 1957 г. институтами ВНИИБТ, Гипроникель, Гипроуглеавтоматизация и ЧНИИГД начаты экспериментально-конструкторские работы по созданию буровых станков для бурения взрывных скважин шарошечными долотами на открытых горных работах.

С 1958 г. работниками указанных институтов на различных горных предприятиях страны начали проводиться планомерные

Параметры буровых станков	Буровые станки фирмы «Джой»					
	58-ВН	59-ВН	60-ВН *	625-ВН **	965-ВН	735-ВН
Диаметр скважины, *мм*	165—187	158—228	223—311	158—200	228—270	158—200
Глубина бурения, *м*	12.2	18	30	45.7	45,7—91.5	45.7
Диаметр штанг, *мм*	109	140—178	178—228	133—152	140—178—203	133—152
Длина штанг, *м*	6.1	6—9	До 15	9.6	9.14	7.6
Длина хода подачи, *м*	1.5	1.5	1.5	9.6	9.14	7.6
Осевая нагрузка, *Т*	17.2	22.7	29.4	21.2	29.4	15.7
Скорость вращения инструмента, *об/мин*	10. 30. 50. 80	25. 48. 67. 116	0—110	27—142	0—120	0—140
Производительность компрессоров, *м³/мин*	14.1	13.9—25.2	24.1	24.1	24.1—50.9	24.1—42.4
Установленная мощность двигателей, *квт*:						
общая	138	145	149	145	350—400	—
привода компрессора	92	55—92	92	92	—	—
привода вращателя	22	27.5	37	37	—	—
Габаритные размеры, *м*:						
высота в рабочем положении	12.5	14.0	15.5	—	16.1	—
высота в транспортном положении	5.5	5.3	6.0	—	4.34	—
длина в рабочем положении	8.5	9.1	10.3	—	9.8	—
длина в транспортном положении	12.5	14.0	15.9	—	—	—
ширина	3.5	4.2	3.3	—	5.48	—
Вес, *т*	24.0	29.5	38.5	23.4	56.6	27.9
Направление бурения	Вертикально вниз		Вертикально вниз и под углом до 30° к горизонтали		Вертикально	

* Последняя модель станка 60-ВН изготовляется в двух модификациях: с центральным

** Станки имеют полноповоротные платформы, что позволяет станкам двигаться вдоль диагональной продольной оси станка.

Таблица 5

Буровые станки фирмы «Бюсайрус-Ирн»					Буровой станок фирмы «Чикаго-Пневматик»	Буровой станок фирмы «Ингерсолл-Рэнд»
30-R	40-R	50-R	60-R	61-R	С-750	Дриллмастер ДМ-3
158—200	171—228	250—311	270—330	330—381	152—228	102—159
31.0	33.7	40.0	40.0	45.0	—	18
114—158	139—178	178—218	218			
6.3	8.2	10			10—15.2	
6.0	8.0	9.8			9.8—15	7.6
13.4	24.5	29.4	35	40.0	20.4	9.1
0—110	0—110	0—110	—	—	0—73	—
15.6—19	19.4	37.2	37.2—50.9	—	16	17
103	132	236	300	—	240	275
От ходового двигателя		104	—	—	От ходового двигателя	
11	11	18.2	—	—	—	От ходового двигателя
10.9	14.3	16.2	—	—	—	11.0
3.6	3.9	4.5	—	—	—	4.0
6.6	8.9	10.0	—	—	—	5.7
9.7	13.4	15.2	—	—	—	9.12
3.3	4.3	4.5	—	—	—	3.4
21.8	37.3	50.0	—	—	34	14
Вертикально вниз и под углом до 30° к горизонтали				Вертикально вниз и под углом до 30° к горизонтали		

и консольным расположением мачт, при котором возможно бурение наклонных скважин. борта уступа, обуривать уступ наклонными скважинами, лежащими в плоскости, перпен-

работы по изучению бурения взрывных скважин с помощью шарошечных долот.

На этом этапе, как правило, использовались серийные трех- и четырехшарошечные долота, предназначенные для бурения нефтяных и газовых скважин. Эти шарошечные долота имели трехрядную опору качения, а вооружение их шарошек было выполнено в виде выфрезерованных из тела шарошек зубцов, наплавленных зерновым твердым сплавом.

На некоторых предприятиях эти шарошечные долота дали положительные результаты и получили определенное распространение, на других они были менее эффективными, а на третьих оказались совершенно неэффективными.

В одних случаях быстро изнашивалось зубчатое вооружение шарошек, в других заклинивались опоры шарошек.

Это объясняется бурением взрывных скважин в основном в абразивных породах от нижесредней крепости до особо крепких, которые в значительно большей степени влияют на износ вооружения шарошек, чем породы осадочного комплекса, проходимые при бурении нефтяных и газовых скважин.

Кроме того, специфическим требованием открытых горных работ является очистка забоя и ствола скважины от шлама сжатым воздухом из-за:

— трудности доставки к станкам воды и использования ее на карьерах, расположенных в районах с сухим и жарким климатом (Средняя Азия, Казахстан, Кавказ), резко континентальным климатом (Урал, Сибирь, Дальний Восток), суровым полярным климатом (Кольский полуостров, Якутия, север Красноярского края и др.);

— опасности обводнения нижележащих горизонтов водой, которая будет вытекать из скважин по трещинам, образовавшимся в результате предшествовавших взрывных работ;

— опасности выщелачивания ряда полезных ископаемых.

Эти особенности бурения взрывных скважин на открытых работах предопределили необходимые решения в конструкциях шарошечных долот, предназначенных для бурения взрывных скважин на открытых горных разработках.

Начиная с 1956 г. Всесоюзным научно-исследовательским институтом буровой техники проведен большой комплекс научно-исследовательских и экспериментально-конструкторских работ, в результате которых созданы высокостойкие и эффективные конструкции шарошечных долот для бурения взрывных скважин на открытых и подземных горных работах:

— для бурения в абразивных крепких и особо крепких хрупких горных породах — долота типов К и ОК диаметрами 76, 97, 112, 145, 190, 214, 243, 269, 295 и 320 *мм*;

— для бурения в абразивных твердых вязких породах — долота типа «ТЗ» диаметрами 76, 97, 112, 145, 190, 214 и 243 *мм*;

— для бурения в перемежающихся твердых и крепких породах — долота типов ТК и ТКЗ диаметрами 190 и 214 *мм*;

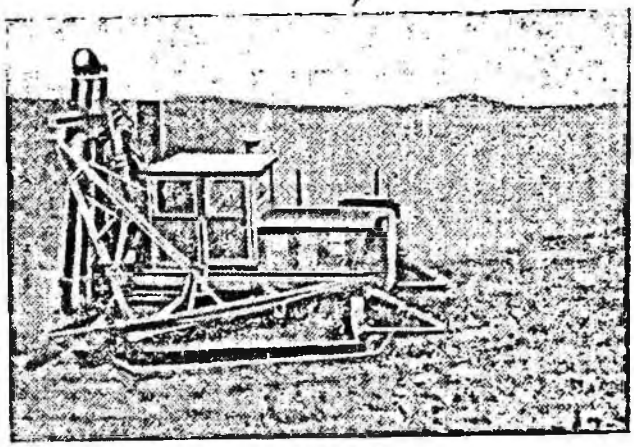


Рис. 1. Буровой станок БТС-2.

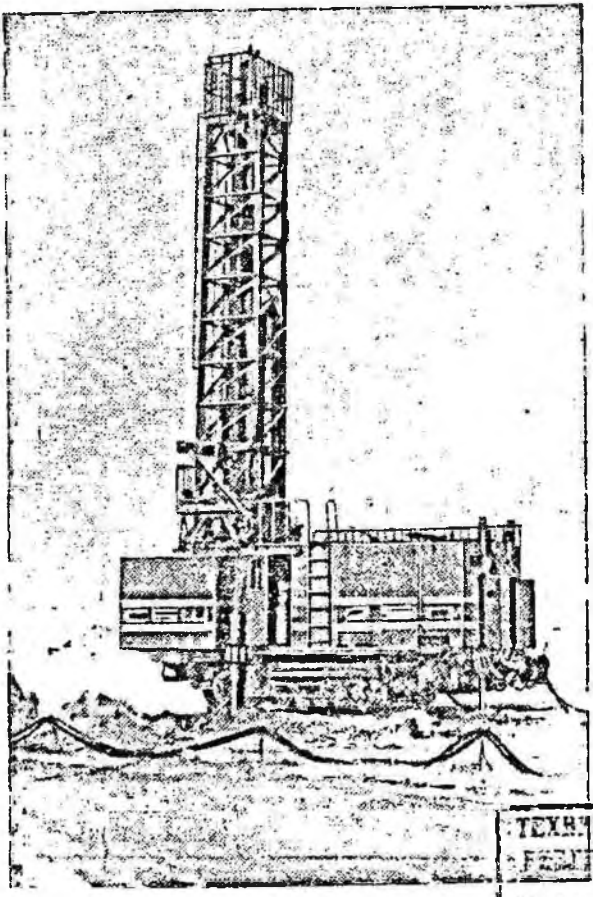


Рис. 2. Буровой станок СБШ-250.

ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

— для бурения в малоабразивных твердых породах и породах средней твердости — долота типов С, СТ и Т диаметрами от 76 до 269 *мм*.

Некоторые конструкции этих долот разработаны совместно с Куйбышевским, Верхне-Сергинским, Дрогобычским и Пермским им. В. И. Ленина долотными заводами.

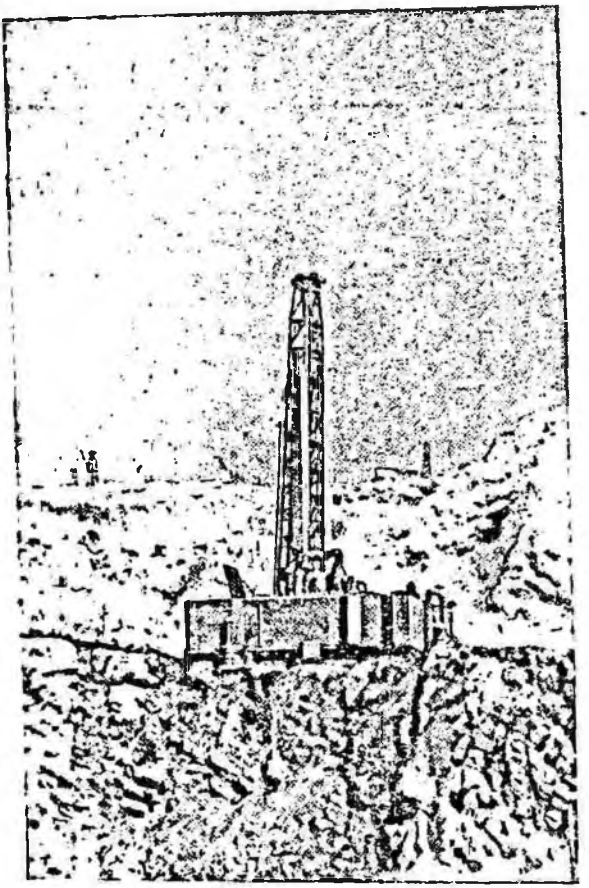


Рис. 3. Буровой станок БАШ-250.

В настоящее время перечисленные типоразмеры шарошечных долот изготовляются серийно долотными заводами страны и широко применяются в горнодобывающих отраслях народного хозяйства, в транспортном и гидротехническом строительстве.

Созданный ВНИИБТ типаж шарошечных долот для бурения взрывных скважин удовлетворяет многообразию горногеологических

Таблица 6

Параметры буровых станков	Модели буровых станков								
	БТС-2	БСШ-1, БСШ-1М	БСШ-2, БСШ-2М	2СБШ-200	БСВ-2	БСВ-3	П-25	СБШ-250	БАШ-250
Диаметр скважины, *мм*	До 145	190—214	190—214	214	214	214	214—243	243	243—269
Глубина бурения, *м*	До 20	До 24	До 24	До 24	До 20	До 20	До 24	До 24—32	До 22,5
Диаметр штанг, *мм*	108	152	152	180	180	180	168	200	194
Ход механизма подачи, *м*	2	1,0—1,2	1,0	1,0	1,1	1,1	8,0	8,0	0,45
Способ подачи инструмента на забой	Гидравлический				Гидравлический		Канатно-гидравлический		
Осевая нагрузка на долото, *Т*	До 9	До 14	До 18	До 22	До 20	До 20	До 20	До 24	До 40
Скорость вращения инструмента, *об/мин*	До 120—140	30—300	30—300	60—300, 30—150	67, 124, 180	45, 58, 90, 116	86	62	50—165, 150—300
Компрессоры марки	—	ЗИФ-5	ЗИФ-5	К-9	К-9	К-9	К-9	К-9	К-9
Количество компрессоров, установленных на шасси станка	—	2	2	2	2	1	2	2	3
Суммарная производительность компрессоров, *м³/мин*	—	10	10	18	18	13	18	18	27
Установленная мощность электродвигателей, *квт*	—	156	175,5	253	212	166	301	322	320
Габаритные размеры, *мм*:									
длина в рабочем положении	7420	6 970	7 640	8 360	5 980	5 650	7 950	7 820	10 780
длина в транспортном положении	7420	12 700	12 200	10 310	6 570	—	14 100	14 450	18 980
высота в рабочем положении	5140	10 400	10 425	10 700	11 540	12 170	14 450	14 250	17 090
высота в транспортном положении	3600	3 210	4 280	5 520	5 980	8 370	5 320	5 320	5 950
ширина	3100	3 500	3 500	5 150	3 960	4 250	4 350	4 690	5 400
Вес, *т*	16	36	39	45	34,5	31	42	50	72

условий горных предприятий, разрабатывающих месторождения руд черных, цветных и редких металлов, горнохимического сырья, нерудных и строительных материалов, флюсового и огнеупорного сырья, строительства гидротехнических, транспортных и других инженерных сооружений.

Параллельно с работами по созданию высокоэффективных конструкций шарошечных долот для бурения взрывных скважин в течение 1958—1966 гг. рядом научно-исследовательских и проектных организаций и предприятий проведены работы по созданию конструкций буровых станков для бурения взрывных скважин на открытых горных работах с помощью шарошечных долот.

В настоящее время изготовляются серийно и в виде крупных промышленных партий и широко применяются буровые станки следующих моделей: БСШ-1, БСШ-1М, БСШ-2, БСШ-2М, 2СБШ-200, БСВ-2, БСВ-3, П-25, СБШ-250, БАШ-250, а также станки БТС-2 для транспортного и гидротехнического строительства (рис. 1, 2, 3), ведутся работы по созданию станков БАШ-320 и СБШ-320.

Технические характеристики этих станков приведены в табл. 6.

В 1965 г. на горных предприятиях страны и при строительстве транспортных, гидротехнических и других инженерных сооружений находилось в эксплуатации свыше 700 буровых станков типа БСШ, БСВ, П-25, СБШ-250 БАШ-250 и свыше 200 станков БТС-2, которыми выполнено около 30% объема буровых работ при добыче твердых полезных ископаемых и свыше 60% буровых работ в транспортном строительстве.

Технико-экономические показатели бурения взрывных скважин шарошечными долотами на открытых горных разработках

Анализ технико-экономических показателей бурения взрывных скважин шарошечными долотами произведен нами на основании фактических данных более чем по 50 карьерам страны, разрабатывающим руды цветных и черных металлов, горнохимическое сырье, строительные материалы, флюсовое и огнеупорное сырье и другие полезные ископаемые.

Сменная производительность бурения

Сменная производительность бурения (на станко-смену) является одним из основных показателей буровых работ.

Среднесменная производительность на один работающий станок определяется как частное от деления общегодового (месячного, квартального) объема выполненных буровых работ в метрах на фактическое количество рабочих станко-смен за год (соответственно, месяц, квартал).

В табл. 7 приведены усредненные данные о производительности бурения взрывных скважин (на станко-смену) различными способами на открытых горных разработках в зависимости от крепости

Таблица 7

Способ бурения, тип буровых станков	Диаметр скважины, мм	Сменная производительность	
		м	м³
Породы с коэффициентом крепости $f=2\div4$			
Вращательное бурение резцовыми коронками, станки СВБ-2	150—160, 200—250	90—150, 90—110	2700—5700, 3600—6500
Шарошечными долотами, станки СВБК-200, БСШ-1М	190	80—100	2400—5600
Ударно-канатное, станки БУ-2-20	200—220	30—45	1800—2700
Погружными пневмоударниками, станки Урал-61	155	70—90	1400—1800
Породы с коэффициентом крепости $f=4\div6$			
Вращательное бурение резцовыми коронками, станки СВБ-2	150—160	30—75	1800—3500
Шарошечными долотами, станки СВБК-200, БСШ-1М	190	50—70	2000—3200
Ударно-канатное, станки БУ-2-20	200—220	20—25	800—1500
Погружными пневмоударниками, станки БМК-4, СБМК-5	105	20—40	400—800
Породы с коэффициентом крепости $f=6\div8$			
Вращательное бурение резцовыми коронками, станки СВБ-2	150—160	20—30	300—450
Шарошечными долотами, станки БСШ-1М, БСШ-2М	190	40—50	1600—2500
Шарошечными долотами, станки БСВ-2, БСВ-3	214	40—60	2000—3000
Ударно-канатное, станки БУ-2-20	200—240	15—18	800—1200
Погружными пневмоударниками, станки БМК-4, СБМК-5, БМП-115, НБС-2	105—115	18—25	180—400
Породы с коэффициентом крепости $f=8\div10$			
Шарошечными долотами, станки БСШ-1М, БСШ-2М	190	25—46	1200—1500
Шарошечными долотами, станки БСШ-1М, БСШ-2М	214	23—35	1200—1800
Шарошечными долотами, станки БСВ-2, БСВ-3, П-25	214	30—60	2200—2500
Шарошечными долотами, станки П-25, СБШ-250	243	30—40	1500—2200
Ударно-канатное, станки БУ-2-20	200—230	7—15.5	400—1000
Ударно-канатное, станки БС-1, БС-1М	200—280	7.5—14.7	450—1000
Погружными пневмоударниками, станки БМК-4, СБМК-5, Урал-61	105—155	15—22	180—450

Продолжение табл. 7

Способ бурения, тип буровых станков	Диаметр скважины, мм	Сменная производительность	
		м	м³
Породы с коэффициентом крепости $f = 10 \div 12$			
Шарошечными долотами, станки БСШ-1М, БСШ-2М, СВБК-200	190	24—34	700—1200
Шарошечными долотами, станки БСШ-1М, БСШ-2М	214	18—30	800—1600
Шарошечными долотами, станки БСВ-2, БСВ-3, П-25	214	21—36	1000—1800
Шарошечными долотами, станки П-25, СБШ-250	243	28—36	1200—2000
Ударно-канатное, станки БУ-2-20	200—250	6.7—13	250—800
Ударно-канатное, станки БС-1, БС-1М	200—290	4.7—14.3	250—900
Погружными пневмоударниками, станки БМП-115, НБС-2, НБС-5, Урал-61	115—155	12—18	200—360
Породы с коэффициентом крепости $f = 12 \div 14$			
Шарошечными долотами, станки БСШ-1М, БСШ-2М, БСВ-2, БСВ-3	190—214	16—24	300—800
Шарошечными долотами, станки П-25, СБШ-250, БАШ-250	243	18—25	500—1000
Шарошечными долотами, станки БАШ-250	269	20—28	1000—1400
Ударно-канатное, станки БУ-2-20	200—250	4—7.5	100—400
Ударно-канатное, станки БС-1, БС-1М	200—290	4.7—9	250—450
Погружными пневмоударниками, станки БМК-4, СБМК-5, Урал-61	105—155	8—13	80—260
Породы с коэффициентом крепости $f = 14 \div 16$ и выше			
Шарошечными долотами, станки СБШ-250	243	16—22	600—900
Шарошечными долотами, станки БАШ-250	269	16—24	800—1200
Ударно-канатное, станки БС-1, БС-1М	260—290	2.5—4.0	150—200
Огневое, станки СБО	200—260	10—23	400—1000

Примечание. Сменная производительность в обуренной горной массе учитывает диаметр скважины, сетку их расположения, условия взрываемости пород (блочность, трещиноватость), а также емкость ковшей, применяемых экскаваторов и размеровка дробилок.

буримых пород (следует при этом оговориться, что коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова недостаточно полно характеризует буримость пород).

Как видно из табл. 7, в породах с коэффициентом крепости $f \leqslant 4$ наиболее производительным является вращательное бурение резцовыми коронками (шнековое).

В породах с коэффициентом крепости $f = 4 \div 6$ конкурентоспособным вращательному бурению резцовыми коронками становится бурение шарошечными долотами.

В широком диапазоне горных пород ($f = 6 \div 14$), в основном слагающих месторождения твердых полезных ископаемых, наиболее

производительным является бурение шарошечными долотами: оно превосходит ударно-канатное бурение в 1,5—4 раза, а вращательное бурение резцовыми коронками (шнековое) и бурение погружными пневмоударниками — в кратное число раз.

В породах с коэффициентом крепости $f = 14 \div 16$ и выше с бурением шарошечными долотами начинает конкурировать огневое бурение, область эффективного применения которого ограничивается незначительным кругом пород с высоким содержанием кварца, поддающихся разрушению под действием высоких температур без плавления.

Таким образом, в настоящее время наиболее эффективным способом бурения взрывных скважин на открытых горных работах является бурение шарошечными долотами.

Приведенные в табл. 9 сведения позволяют также проследить закономерное снижение производительности всех без исключения способов механического бурения взрывных скважин на открытых горных работах.

Так, производительность вращательного бурения резцовыми коронками (шнекового) и бурения погружными пневмоударниками с увеличением коэффициента крепости от $f = 2 \div 4$ до $f = 12 \div 14$ снижается более чем в 10 раз.

Производительность бурения шарошечными долотами в диапазоне от $f = 2 \div 4$ до $f = 14 \div 16$ и более снижается почти в 5 раз, а ударно-канатного бурения в том же диапазоне крепости горных пород в 12—15 раз.

Стоимость бурения скважин

В табл. 8 приведены обобщенные данные по стоимости бурения взрывных скважин различными способами на открытых горных работах в зависимости от крепости буримых пород (по 50 карьерам).

Как видно из обобщенных данных, приведенных в табл. 10, в породах с коэффициентом крепости $f = 2 \div 4$ бурение вращательное резцовыми коронками (шнековое), шарошечными долотами, а также погружными пневмоударниками с точки зрения стоимости 1 $м^3$ обуренной горной массы по затратам на бурение практически равноценны и являются экономически более выгодными по сравнению с ударно-канатным бурением.

В породах с коэффициентом крепости $f = 4 \div 6$ вращательное бурение резцовыми коронками (шнековое) и бурение шарошечными долотами также экономически равноценны. В этих породах бурение ударно-канатное и погружными пневмоударниками увеличивает затраты на бурение, отнесенные к 1 $м^3$ обуренной горной массы, по сравнению с бурением вращательным резцовыми коронками и шарошечными долотами соответственно в 2—3 и 3—4 раза.

В породах с коэффициентом крепости $f = 6 \div 16$ и более в настоящее время по экономичности с бурением шарошечными

Таблица 8

бурения, тип буровых станков	Диаметр скважины, мм	Стоимость бурения 1 м							Стоимость 1 м³ горной массы по затратам на бурение, коп.
		всего, руб.	в том числе, %						
			заработная плата	забойный инструмент	амортизационные отчисления	ремонт	энергозатраты		
Породы с коэффициентом крепости $f=2\div4$									
ьное бурение резцовыми коронками СВБ-2	150—160	0.7—1.2	40—45	10	20	13—18	6		2.0—3.2
	200—250	1.5—2.2	40	10	20	13—18	6		2.5—3.7
ыми долотами, станки БСШ-1М	190	1.2—1.5	40—45	5—6	8—10	3—4	8—10		2.2—3.8
натное, станки БУ-2-20	200—220	2.1—4.2	50—60	5—7	10	—	2.5		3.5—7.0
ми пневмоударниками, станки	155	1.2—2.1	Нет сведений						2.0—3.5
Породы с коэффициентом крепости $f=4\div6$									
ое бурение резцовыми коронками СВБ-2	150—160	1.2—1.5	42	17	20	13	6		2.0—3.8
ми долотами, станки СШ-1М	190	1.2—1.8	40—45	<8	8—10	3—4	8—10		2.2—4.0
атное, станки БУ-2-20	200—220	2.7—3.8	40	13—15	15	—	3.5		4.5—6.4
и пневмоударниками, станки -5	105	1.5—2.4	Нет сведений						7.5—12.0
Породы с коэффициентом крепости $f=6\div8$									
е бурение резцовыми коронками СВБ-2	150—160	1.4—1.8	25—30	30—35	20	3—4	5—8		9.4—12.0
ш долотами, станки БСШ-1М.	190	2.1—2.5	24—28	5—8	40	15—20	2—3		5.3—6.3
ыми долотами, станки БСВ-2,	214	2.1—2.2	15—20	3—5	50	15—20	2—3		4.2—4.4
натное, станки БУ-2-20	200—240	2.8—4.0	25—35	10—15	15—20	15—25	5—7		6.5—8.0
и пневмоударниками, станки К-5, БМП-115, НБС-2	105—115	1.6—2.7	30—40	15—17	5—10	20—30	5—7		10—27.0
Породы с коэффициентом крепости $f=8\div10$									
ыми долотами, станки БСШ-1М.	190	2.70—3.90	15—20	15—18	15—38	10—15	5—10		4.5—9.0
ыми долотами, станки БСШ-1М.	214	3.50—4.20	15—20	15—18	15—38	10—15	5—10		4.4—9.0
ыми долотами, станки БСВ-2,	214	2.70—3.50	20	12—17	18—26	10—20	10		4.2—9.3
ыми долотами, станки П-25,	243	2.80—3.80	15—20	<15	35	30	5		5.1—7.6
атное, станки БУ-2-20	200—220	3.10—7.30	30—40	10—15	10—15	10—15	4—7		6.8—14.3
атное, станки БС-1, БС-1М	200—280	5.4—12.8	25—40	5—15	15—20	5—7	3—4		8—15.3
и пневмоударниками, станки К-5, Урал-61	105—155	4.3—4.4	25—30	18—20	20	5—10	2—5		20—45.2
Породы с коэффициентом крепости $f=10\div12$									
ыми долотами, станки БСШ-1М. БК-200	190	2.7—6.5	15—20	<20	20—25	10—25	5—10		7.0—18.6
ш долотами, станки БСШ-1М.	214	3.2—6.1	15—20	<20	20—25	10—25	5—10		5.8—13.6
ш долотами, станки БСВ-2,	214	3.9—6.3	12—15	15—20	20	15	5—10		7.0—12.6
ш долотами, станки П-25,	243	5.3—6.5	15	<17	30	30	5—10		7.1—16.1
тное, станки БУ-2-20	200—250	3.9—9.2	20—30	15—20	15—20	10—15	5—7		10.7—23.4
тное, станки БС-1, БС-1М	200—290	6.3—12.9	25—30	15—20	15—20	10	5—7		9.4—26.0
пневмоударниками, станки -2, НБС-5, Урал-61	115—155	4.7—7.4	25—30	20—25	15	10—15	5—8		21.4—49.2

Продолжение табл. 8

Способ бурения, тип буровых станков	Диаметр скважины, мм	Стоимость бурения 1 м							Стоимость 1 м³ горной массы по затратам на бурение, коп.
		всего, руб.	в том числе, %						
			заработная плата	забойный инструмент	амортизационные отчисления	ремонт	энергозатраты		
Породы с коэффициентом крепости $f=12\div14$									
Шарошечными долотами, станки БСШ-1М, БСШ-2М, БСВ-2, БСВ-3	190—214	4.1—7.1	20	25	20	2—3	5—7		10.2—28.4
Шарошечными долотами, станки П-25, СБШ-250, БАШ-250	243	5.2—7.4	20—25	20—25	20—25	20	3		13.0—18.4
Шарошечными долотами, станки БАШ-250	269	7.2—7.5	20—25	25	25—28	15—20	2		14.4—15.0
Ударно-канатное, станки БУ-2-20	200—250	5.2—9.2	30	25	10—15	10—15	2		16.7—28.7
Ударно-канатное, станки БС-1, БС-1М	200—290	6.4—16.0	20	20	8—10	15	1		15.6—41.0
Погружными пневмоударниками, станки БМК-4, СБМК-5, Урал-61	105—155	4.6—8.3	20	25—30	40	10	8		23.0—82.4
Породы с коэффициентом крепости $f=14\div16$ и более									
Шарошечными долотами, станки СБШ-250	243	7.6	20—25	20—25	20—25	20	2		16.4
Шарошечными долотами, станки БАШ-250	269	7.4	20—25	25	25—30	25	2		14.8
Ударно-канатное, станки БС-1, БС-1М	260—290	12—18	20	30	10	10—15	3		19—30
Огневое, станки СБО	200—260	10.6—11.8	10—15	35—40	15—17	15—17	1		21.0—29.5

Примечание. Сопоставление стоимости 1 м³ обуренной горной массы по затратам на бурение различными способами позволяет учесть диаметр и сетку расположения скважин, а также необходимую степень дробления горной массы и технологические параметры экскаваторов и дробилок.

долотами не может конкурировать ни один из применяемых на открытых горных разработках способов бурения взрывных скважин.

В породах с коэффициентом крепости $f = 6 \div 8$ стоимость 1 $м^3$ обуренной горной массы по затратам на бурение шарошечными долотами в 2—3 раза ниже, чем при вращательном бурении резцовыми коронками, на 30—70% ниже, чем при ударно-канатном и в 3—5 раз ниже, чем при бурении погружными пневмоударниками.

С увеличением крепости буримых пород (в диапазоне $f = 8 \div 16$ и более) экономические преимущества бурения шарошечными долотами возрастают еще значительнее.

Даже в самых крепких породах применяемое в настоящее время на ряде железорудных карьеров огневое бурение (с использованием в качестве окислителя кислорода) не может составить экономической конкуренции бурению шарошечными долотами.

В табл. 8 также приведена обобщенная структура стоимости бурения 1 *м* скважины различными способами.

Анализ приведенной обобщенной структуры стоимости бурения 1 *м* скважины показывает, что:

— с увеличением крепости буримых пород при всех способах бурения взрывных скважин закономерно снижается удельный вес заработной платы и возрастают затраты на буровой забойный инструмент (резцовые и пневмоударные коронки, погружные пневмоударники, долота, штанги и т. п.);

— весьма существенны (до 20—40% от общих затрат на бурение) амортизационные отчисления, особенно при применении буровых станков новых конструкций (П-25, СБШ-250, БСВ-3, СБО и др.), изготовленных в виде опытно-промышленных партий или первых малых промышленных серий, что является следствием высокой стоимости этих буровых станков;

— высоки затраты на ремонт буровых станков, особенно станков типа БСШ, П-25, СБШ-250, БАШ-250 и др.; это свидетельствует о том, что отдельные узлы и механизмы этих станков не обладают еще необходимыми прочностью, работоспособностью и долговечностью, нуждаются в дальнейшем совершенствовании или изменении принципиального конструктивного и технологического решения.

§ 2. Состояние техники бурения взрывных скважин на подземных горных работах

Бурение глубоких взрывных скважин все шире внедряется на подземных рудниках СССР, так как это позволяет применять более совершенные системы разработки: с увеличенной высотой подэтажа и этажа, большими размерами блоков и камер, меньшим удельным объемом нарезных и подготовительных работ, повышенным выходом руды с 1 *м* скважины и большей производительностью труда.

Буровые станки

При подземной разработке мощных и средней мощности месторождений преимущественное распространение имеют станки с погружными пневмоударниками, главным образом различные модификации станка БА-100 (БА-100М, БА-100П1, БА-100К). Станки с погружными пневмоударниками типа ЛПС-3 применяются на рудниках Лениногорского комбината, что объясняется возможностью и высокой эффективностью в условиях комбината применять скважины диаметром 130—150 *мм*, не опасаясь нарушения охранных целиков и пр. По этим же причинам на рудниках Норильского комбината до последнего времени применялись пневмоударные станки типа БМН-3. Станки типа ЛПС-3 получили также некоторое распространение на рудниках Зыряновского и Иртышского комбинатов. В течение 1962—1964 гг. на подземные рудники начали поступать полуавтоматические пневмоударные станки НКР-100. В настоящее время станки НКР-100 широко применяются на ряде подземных рудников страны.

Станки типа СБ-4 для бурения шарошечными долотами в железорудной промышленности не получили распространения из-за низких показателей работы шарошечных долот ДШ-10 в породах с $f = 10 \div 18$ (КМА), большого веса и габаритов, но применяются на ряде рудников цветной металлургии (Лениногорском, им. 40-летия ВЛКСМ, Салаирском, Миргалимсайском, им. XXII съезда КПСС, рудниках комбинатов «Сихали» и «Текели»), а также на рудниках комбината «Апатит». Станки СБ-4 получили распространение главным образом на рудниках Рудного Алтая. По-видимому, это объясняется тем, что единственным заводом, изготовлявшим станки СБ-4, был Новосибирский завод «Труд», и тем, что станки СБ-4 внедрялись бывшим институтом НИГРИС, создавшим и внедрившим их исключительно на свинцово-цинковых рудниках. Попытки применения станков СБ-4 на медных рудниках Урала (Дегтярский) и железных рудниках (им. Губкина) успеха не имели из-за частых поломок штанг, отсутствия запасных частей к станкам, конструктивных недостатков станков СБ-4, низкой стойкости долот ДШ-10 и их большого диаметра (150 *мм*).

Станками СБ-4 ежегодно пробуривается около 5,5—7,5% от всего годового объема бурения скважин на подземных рудниках СССР.

Станок СБ-4 с 1954 г. не претерпел сколько-нибудь существенных конструктивных изменений, а вновь разработанные станки для бурения шарошечными долотами (РША-150 конструкции ВНИИ-Цветмет, АБШ конструкции Гипрорудмаша, БАШ-150 конструкции Гипроникеля, БШ-145 конструкции Гипромашобогащение) до настоящего времени применяются в небольшом количестве.

Станки вращательного бурения кольцевыми твердосплавными коронками типа ГП-1 применяются в породах мягких и средней

Таблица 9

Параметры буровых станков	Станки для бурения скважин погружными пневмоударниками			Станки для бурения скважин шарошечными долотами	
	БА-100 (БА-100М, БА-100П1, БА-100К)	НКР-100	ЛПС-3	СБ-4 (СБ-5)	БШ-145
Глубина бурения, *м*	50	До 80	30	50	50
Диаметр скважины, *мм*	100—110	100—150	100—150	145	145
Диаметр штанг, *мм*	50	50	63,5	89—114	89—114
Скорость вращения шпинделя, *об/мин*	68—75	76	34	96	180
Длина хода подачи, *мм*	400	365	1000	500	750
Усилие подачи (макс.), *кГ*	До 600	До 1200	До 900	До 6000	До 12 000
Расход воздуха при бурении, *м³/мин*	4,0—6,0	4,0—15,0	6,0	—	—
Расход воды при бурении, *л/мин*	8—12	8—12	8—12	До 200	До 200
Тип пневмоударника	М-1900	М-1900	П-150	—	—
Тип двигателя вращателя	Электрический		Пневматический	Электрический	
Мощность двигателя вращателя	2,8 *квт*	2,8 *квт*	4 *л. с.*	14 *квт*	
Подающее устройство	Пневматические цилиндры			Гидравлические цилиндры	
Способ удаления из скважины разбуренной породы	Воздушноводяной смесью			Водой	
Габаритные размеры, *мм*:					
длина	1400	—	2600	2500	
ширина	560	—	1000	765	
высота	700—2000	—	2000	2460—2960	
Вес, *кг*	325—258	235	188	1330	1186

крепости (до $f = 8$), главным образом для разведочных целей, однако на ряде рудников цветной металлургии станки ГП-1 успешно конкурируют со станками БА-100 при бурении взрывных скважин. Применение станков ГП-1 устаревших конструкций объясняется отсутствием более совершенных станков вращательного бурения с электроприводом и невозможностью бурения скважин малого диаметра (менее 100 *мм*) станками пневмоударного и шарошечного бурения.

На некоторых рудниках Кривбасса в породах мягких ($f = 4 \div 6$) имеют ограниченное применение станки вращательного бурения типа АБВ-1. Объем бурения станками ГП-1 и АБВ-1 не превышает 5000 *м* в год.

В табл. 11 приведены технические характеристики буровых станков, применяемых на подземных рудниках страны.

Таким образом, бурение погружными пневмоударниками в настоящее время продолжает оставаться основным способом бурения глубоких взрывных скважин на большинстве подземных рудников.

Однако в последние годы все большее значение приобретает бурение шарошечными долотами, которое на ряде рудников начинает вытеснять бурение погружными пневмоударниками.

Забойный буровой инструмент

В качестве забойного бурового инструмента на подземных горных работах применяются пневмоударные коронки К-100В (БК-105) с погружными пневмоударниками М-1900 или однотипными для станков БА-100, НКР-100, шарошечные долота 6Н-145-ОК (6Л-145-ОК) конструкции ВНИИБТ, которые в последние годы полностью заменили шарошечные долота ДШ-10 конструкции НИГРИС.

В табл. 10 [3] приведена средняя проходка на коронку (на одну заточку и до полной амортизации) погружными пневмоударниками и шарошечными долотами в горных породах с различными коэффициентами крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова.

Качество забойного бурового инструмента за последние несколько лет повысилось, особенно качество изготовления погружных пневмоударников. Значительно сократилось число поломок державок коронок и пластин твердого сплава, улучшилось качество пайки. Это объясняется главным образом организацией централизованного производства, улучшением технологии изготовления пневмоударников и коронок к ним на заводах горного машиностроения.

Однако износостойкость твердого сплава при бурении в крепких абразивных породах по-прежнему недостаточна.

Качественным скачком в деле увеличения проходки на шарошечные долота явилась замена долот ДШ-10 долотами 6-6вК конструкции ВНИИБТ при бурении скважин в абразивных крепких породах, дающих хрупкое разрушение. Средняя проходка на долото 6-6вК в 1961 г. по Лениногорскому комбинату, где с участием авторов

Таблица 10

Коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова	Проходка за одну заточку, м	Количество заточек	Проходка до полной амортизации, м
Коронки К-100В (БК-105) и однотипные для погружных пневмоударников			
4—8	15—30	4—6	60—120
8—12	10—20	3—4	40—60
12—14	8—10	2—3	20—25
14—18	2.5—5	2—3	5—12
Погружные пневмоударники М-1900 и однотипные			
4—8	—	—	500—800
8—12	—	—	350—400
12—14	—	—	250—300
14—18	—	—	100—250
Шарошечные долота ДШ-10, 6Н-145-ОК (6Л-145-ОК)			
6—8	—	—	75 / 100—120
8—12	—	—	25—30 / 50—60
12—14	—	—	10—12 / 30—40
14—18	—	—	8—10 / 25—30
			2.5 / 22

В числителе — при бурении восстающих, в знаменателе — при бурении нисходящих скважин. Левая колонка — проходка на долота ДШ-10, правая — на долота 6Н-145-ОК (6Л-145-ОК).

было отработано около 1000 долот 6-6вК, составила при бурении восстающих скважин около 22 *м*, нисходящих скважин около 20 *м*.

В этих же условиях средняя проходка на долото ДШ-10 составила при бурении восстающих скважин 8—10 *м*, нисходящих скважин 2,5 *м*.

С 1961 г. Ремонтно-механическая база Лениногорского полиметаллического комбината по чертежам и технологии ВНИИБТ освоила серийное производство шарошечных долот 6-6вК, а затем 6Н-145-ОК (6Л-145-ОК). Начиная с 1962 г., в крепких породах Рудного Алтая бурение на станках СБ-4 ведется почти исключительно долотами 6Н-145-ОК (6Л-145-ОК) конструкции ВНИИБТ.

Технико-экономические показатели бурения взрывных скважин на подземных рудниках Советского Союза

Оценка технико-экономических показателей бурения произведена нами на основании анализа фактических данных по 34 наиболее представительным подземным рудникам [1].

Сменная производительность бурения

На рудниках учет сменной производительности бурения производится по двум показателям — на станко-смену и на человеко-смену в метрах скважин.

Более универсальным показателем, учитывающим диаметр, сетку расположения и направление скважин, степень механизации станка и организацию буровых работ, является производительность (в m или $м^3$) обуренной горной массы (на станко-смену и на человеко-смену).

В табл. 11 приведены усредненные данные о производительности бурения различными станками в зависимости от крепости пород.

Таблица 11

Способ бурения и тип буровых станков	Диаметр скважины, мм	Коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова	Сменная производительность (на станок)	
			м	т
Погружными пневмоударниками, станки БА-100 (БА-100М, БА-100П1, БА-100К), НКР-100	100—110 100—110 100—110	6—10 12—14 14—18	8—17 6—12 4.5—6	90—350 90—200 100—160
Погружными пневмоударниками, станки ЛПС-3, БМН-3	150	12—16	4—6	60—120
Шарошечными долотами, станки СБ-4, БШ-145	145—150	6—12 12—16	14—20 8—12	350—600 100—250
Дробовое, станки СВБ и ЗИВ-75	130—150	14—18	0.9—1.2	30—50

Из табл. 13 видно, что при подземных работах бурение шарошечными долотами производительнее, чем пневмоударниками.

Таким образом, с увеличением коэффициента крепости пород от $f = 6 \div 10$ до $f = 12 \div 16$ сменная производительность (на станок) снижается в 2—3 раза при бурении как погружными пневмоударниками, так и шарошечными долотами.

Стоимость бурения скважин

В табл. 12 приведены обобщенные данные по стоимости бурения в зависимости от крепости буримых пород по 34 рудникам [31].

Анализ приведенных в табл. 14 сведений показывает:

— с увеличением крепости пород себестоимость бурения скважин пневмоударными станками типа БА-100 и НКР-100 резко возрастает (в 3—6 раза), при этом удельный вес затрат на буровой забойный инструмент увеличивается примерно в 2—2,5 раза при одновременном снижении удельного веса заработной платы в 1,5 раза, несколько возрастают при этом и энергетические затраты;

Таблица 12

Способ бурения, тип буровых станков	Диаметр скважины, мм	Коэффициент крепости пород по М. М. Протодьяконову	Стоимость бурения 1 м скважины				Стоимость 1 т горной массы по затратам на бурение, коп.*
			всего, руб.	в том числе, %			
				заработная плата	буровой забойный инструмент	энергетические затраты	
Пневмоударное, станки БА-100 (БА-100М, БА-100П1, БА-100К), НКР-100	100—110	6—10	2.5—3.1	52—75	15.5—16.5	3—7	21—30
	110—110	12—14	5.6—8.0	50—70	15—30	3—7	45—67
		14—18	6.8—10.2	35—45	30—40	До 10	50—80
Пневмоударное, станки ЛПС-3, БМН-3	150	12—16	6.2—8.4	20—30	50—60	15—18	35—48
Шарошечными долотами, станки СБ-4, БШ-145	145	6—10	2.1—3.0	55—65	20—40	5	8—10
	145	12—16	5.6—6.2	25—30	30—50	До 5	27—35

Примечание. При бурении шарошечными долотами нисходящих скважин в породах с $f=12\div16$ стоимость 1 m горной массы 20—22 коп.

* См. примечание к табл 10.

— удельные затраты на буровой забойный инструмент при бурении станками ЛПС-3, БМН-3, СБ-4 и БШ-145 наиболее высокие и в породах с $f = 12 \div 16$ достигают 60%;

— наиболее высокие энергетические затраты имеют место при бурении станками ЛПС-3 (с пневмодвигателем вращателя): в породах с $f = 12 \div 16$ они достигают 18%.

Сравнение различных способов бурения взрывных скважин на подземных рудниках

Для сопоставления и анализа технико-экономических показателей бурения взрывных скважин различными способами на подземных горных работах целесообразно проследить их показатели в динамике, по мере совершенствования и внедрения все в бо́льших масштабах (так как эти процессы для пневмоударного и шарошечного бурения протекали параллельно), что позволит оценить как проведенную в этом направлении в течение ряда лет работу, так и потенциальные возможности, перспективы и пути развития различных способов бурения в подземных условиях.

За десять лет (1955—1965 гг.) объем бурения шарошечными долотами на Лениногорском руднике Лениногорского комбината увеличился с 2918 до 23441 *м*, или более чем в 8 раз; на руднике им. 40-летия ВЛКСМ того же комбината в 1965 г. пробурено свыше 50,5 тыс. *м* против 875 *м* в 1955 г. В целом по Лениногорскому комбинату объем бурения шарошечными долотами в 1965 г. по сравнению с 1955 г. возрос в 20 раз [1, 2, 3].

Аналогичная картина наблюдается и на других подземных рудниках. Так, на руднике им. XXII съезда КПСС Зыряновского свинцового комбината в 1960 г. шарошечными долотами пробурено около 34 тыс. *м* против 19,2 тыс. *м* в 1958 г. На рудниках Текелийского комбината объем бурения шарошечными долотами в 1960 г. возрос по сравнению с 1958 г. в 2,8 раза и составил 15 тыс. *м* [1, 2, 3].

На рис. 4 представлено изменение удельного веса различных способов бурения взрывных скважин на подземных рудниках Лениногорского полиметаллического комбината за 1955—1965 гг.

Столь значительное увеличение объема бурения шарошечными долотами объясняется ростом производительности и снижением себестоимости буровых работ.

Например, на рудниках Лениногорского комбината среднесменная производительность на станок СБ-4 в 1965 г. возросла почти в 3 раза по сравнению с 1955 г., хотя за этот период продолжительность смены сократилась с 8 до 6 ч.

Рост производительности бурения (рис. 5) позволил снизить себестоимость буровых работ (рис. 6), чему также способствовало внедрение шарошечных долот 6-6вК, а затем 6Н-145-ОК конструкции ВНИИБТ.

Так, за период с 1956—1965 гг. себестоимость бурения 1 *м* скважины на Лениногорском полиметаллическом комбинате снизилась

в 3—3,5 раза, а на рудниках Зыряновского свинцового комбината в 2,5 раза.

Сравнивая технико-экономические показатели бурения скважин различными способами на рудниках Лениногорского полиметаллического комбината (рис. 5 и 6), можно заметить, что как по производительности, так и по себестоимости бурение шарошечными долотами

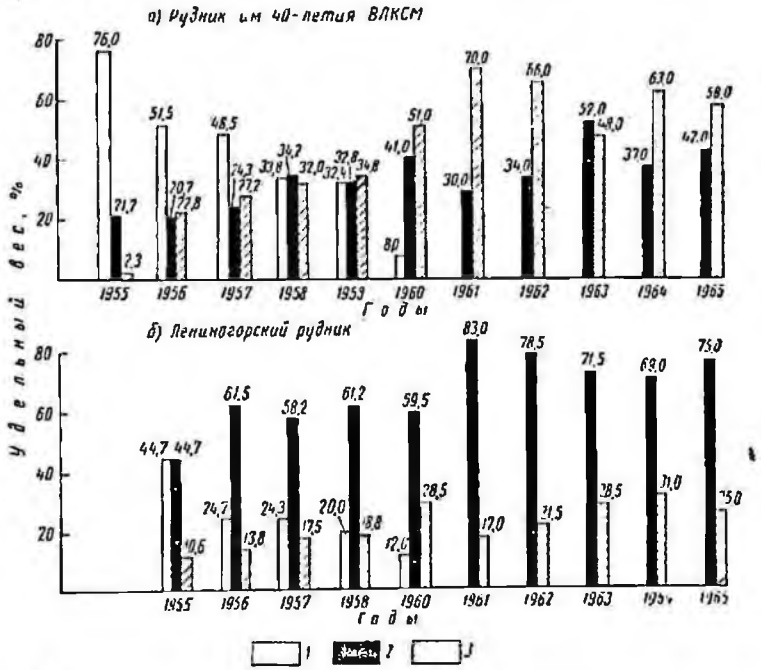


Рис. 4. Динамика изменения удельного веса различных способов бурения взрывных скважин на подземных рудниках Лениногорского полиметаллического комбината за 1955—1965 гг.

1 — дробовое бурение; *2* — пневмоударное бурение; *3* — бурение шарошечными долотами.

имеет явные преимущества по сравнению с бурением погружными пневмоударниками.

Если же учесть выход горной массы с 1 *м* скважины при бурении обоими способами, то преимущество бурения шарошечными долотами еще больше: по производительности в 2,5—3,5 раза и по стоимости на 30—50%.

Такая же картина имеет место и на других подземных рудниках. На руднике «Текели» себестоимость обуривания 1 *т* горной массы шарошечными долотами в 1961 г. была на 13,7% ниже, чем при пневмоударном бурении. На руднике им. XXII

съезда КПСС Зыряновского комбината в 1962 г. стоимость бурения шарошечными долотами, отнесенная к 1 $м^3$ горной массы, была на 25% ниже, чем при пневмоударном бурении. На рудниках комбината «Апатит» эти цифры еще выше: при бурении в апатито-нефелиновых

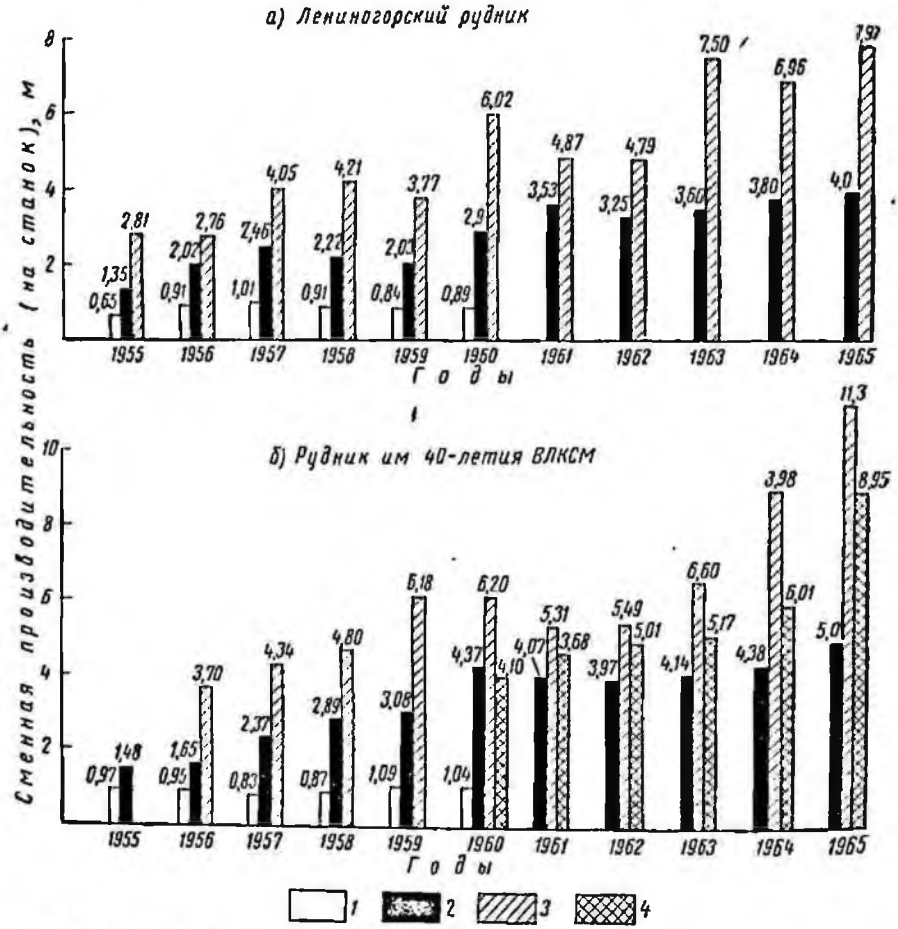


Рис. 5. Динамика изменения среднесменной производительности бурения взрывных скважин различными способами на подземных рудниках Лениногорского полиметаллического комбината за 1955—1965 гг.

1 — дробовое бурение; *2* — пневмоударное бурение; *3* — бурение шарошечными долотами восстающих скважин; *4* — бурение шарошечными долотами нисходящих скважин.

рудах стоимость бурения шарошечными долотами, отнесенная к 1 *м* обуренной горной массы, составила 0,083 руб., в то время как при пневмоударном бурении стоимость обуривания 1 *м* равна 0,24 руб., или почти в три раза выше [1].

При бурении шарошечными долотами достигается весьма малое пылеобразование, в то время как при бурении погружными пневмоударниками уровень запыленности выше.

Если же сравнить по производительности дробовое бурение и бурение шарошечными долотами, то последнее в 4 раза производительнее (в расчете на станко-смену).

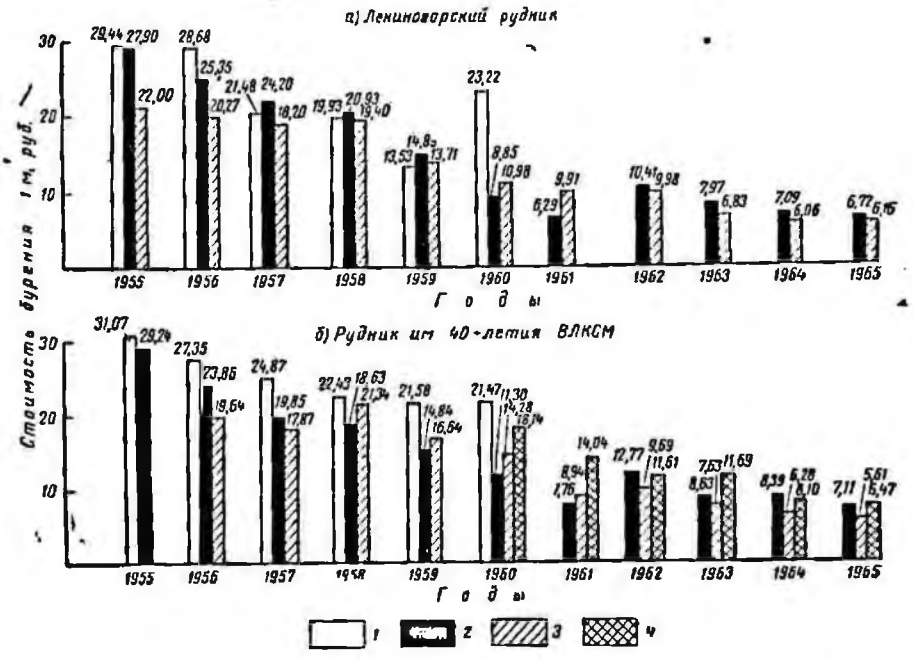


Рис. 6. Динамика изменения стоимости бурения 1 м скважины различными способами на подземных рудниках Ленногорского полиметаллического комбината за 1955—1965 гг.

1 — дробовое бурение; *2* — пневмоударное бурение; *3* — бурение шарошечными долотами восстающих скважин; *4* — бурение шарошечными долотами нисходящих скважин.

Это предопределило резкое изменение объема и удельного веса бурения взрывных скважин различными способами на ряде рудников Советского Союза.

На руднике им. 40-летия ВЛКСМ за 10 лет (1955—1965 гг.) удельный вес бурения шарошечными долотами возрос с 2,3 до 58%. В то же время удельный вес дробового бурения сократился с 76% до нуля.

В 1962 г. на рудниках Зыряновского комбината удельный вес бурения шарошечными долотами возрос до 45,7%, а удельный вес пневмоударного бурения снизился до 47,5%.

В 1965 г. удельный вес бурения шарошечными долотами в целом по Лениногорскому комбинату составил 40,5%.

Таким образом, бурение шарошечными долотами наряду с бурением погружными пневмоударниками на ряде крупнейших подземных рудников является основным способом бурения взрывных скважин. Дробовое бурение практически полностью вытеснено более производительными и экономичными способами бурения — шарошечными долотами и пневмоударниками.

Однако применяемые на отечественных подземных рудниках технические средства для бурения глубоких взрывных скважин позволяют бурить скважины диаметром только 100—145 *мм*.

Скважинные заряды диаметром 100 *мм* и более оказывают сильное сейсмическое воздействие на потолочины, междукамерные и другие целики.

По этой причине с 1960 г. горнотехнической инспекцией запрещено применение скважин диаметром более 80 *мм* на Джезказганском руднике, в результате чего производительность бурения (станки ГП-1 взамен ранее применявшихся станков БМК-2б и БА-100) снизилась в 1,5—2 раза [60].

Этим же объясняется тот факт, что на Дегтярском медном руднике отказались от бурения взрывных скважин шарошечными долотами диаметром 145 *мм* и этот прогрессивный способ бурения получил в настоящее время широкое распространение только на некоторых рудниках страны.

На зарубежных подземных рудниках при системах разработки, базирующихся на отбойке горной массы глубокими взрывными скважинами, последние, как правило, бурят диаметром не более 80 *мм*.

По мнению акад. Н. В. Мельникова, применение при подземной отбойке руд скважин уменьшенного диаметра позволит не только повысить эффективность буровзрывных работ, но и всего комплекса очистной выемки, увеличить интенсивность разработки месторождений вследствие резкого улучшения качества отбойки руды (гранулометрического ее состава), создает предпосылки к организации поточного производства.

Опыт рудника им. XXII съезда КПСС Зыряновского комбината, которому присвоено звание Рудника Коммунистического Труда, также показывает, что уменьшение диаметра скважин (до 100 *мм*) и сужение сетки расположения скважин позволяет снизить стоимость отбойки горной массы на 20% и увеличить производительность труда скреперистов на 21—32%.

Таким образом, для подземных горных работ необходимо создание эффективных технических средств бурения взрывных скважин диаметром менее 100 *мм*, в первую очередь износостойкого и высокопроизводительного бурового забойного инструмента и транспортабельных буровых станков с высоким уровнем механизации вспомогательных операций и автоматизацией процесса бурения.

Создание достаточно мощных погружных пневмоударников для бурения скважин диаметром менее 100 *мм* весьма затруднительно. Многолетние работы С. П. Юшко, ИГД СО АН СССР, завода «Коммунист», НИГРИ и других по созданию погружных пневмоударников для бурения скважин диаметром 75—80 *мм* до сих пор не увенчались успехом.

Опыт бурения глубоких взрывных скважин на подземных рудниках неоспоримо показывает технико-экономические преимущества бурения шарошечными долотами по сравнению с бурением погружными пневмоударниками и другими способами. Более того, в настоящее время не существует сомнений в целесообразности применения шарошечных долот при бурении взрывных скважин в крепких и особокрепких абразивных породах.

В течение последних 2—3 лет во ВНИИБТ авторами настоящей книги проведен большой комплекс экспериментально-исследовательских работ по созданию шарошечных долот малых диаметров, в результате которых разработаны, испытаны в значительных объемах, переданы заводам-изготовителям и серийно изготовляются шарошечные долота диаметром 76 *мм* типов Т, ТЗ и ОК, диаметрами 97 и 112 *мм* типов ТЗ и ОК.

К сожалению, до настоящего времени эти долота на подземных рудниках почти не применяются из-за отсутствия промышленного производства буровых станков для бурения взрывных скважин шарошечными долотами указанных размеров.

Шарошечные долота диаметрами 76, 97 и 112 *мм* в настоящее время широко применяются при бурении взрывных, цементационных и других скважин в транспортном и гидротехническом строительстве, а также при бурении сейсмических, структурно-поисковых, геологоразведочных скважин при разведке на нефть, газ, твердые полезные ископаемые. В этих отраслях промышленности для бурения скважин шарошечными долотами применяются геологоразведочные станки ЗИФ-300М, ЗИФ-650, ЗИФ-1200, УРБ-2, УРБ-ЗАМ, а также станки БТС-2.

Глава III

ТИПЫ, РАЗМЕРЫ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ И ИХ ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Шарошечные долота предназначены для бурения скважин сплошным забоем, т. е. рабочие (породоразрушающие) элементы шарошек долот при бурении разрушают всю поверхность забоя скважины.

В зависимости от горнотехнических условий и технологии ведения буровых работ шарошечные долота могут применяться при бурении наклонных и вертикальных восстающих и нисходящих, а также горизонтальных скважин.

Бурение шарошечными долотами может производиться в сухих или обводненных как монолитных, так и трещиноватых горных породах.

В качестве рабочего агента для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы могут применяться техническая вода, буровые растворы на различной основе, сжатый воздух, различные газы и аэрированные жидкости.

Приводом для вращения шарошечных долот (через буровые штанги и бурильные трубы) могут служить двигатель вращателя бурового станка или ротор буровой установки, а также погружные забойные двигатели: турбобуры и электробуры.

Классификация шарошечных долот

В зависимости от количества шарошек шарошечные долота бывают одно-, двух-, трех- и многошарошечные.

Наибольшее распространение получили трехшарошечные долота.

Одно- и двухшарошечные долота в настоящее время в силу специфичности их конструкций имеют весьма ограниченную область применения.

Многошарошечные долота, как правило, применяются при бурении скважин большого диаметра (600 *мм* и более): водопонижающие, дренажные и другие скважины специального назначения, шурфы, вентиляционные, лесоспускные, шахтные стволы и пр.

В зависимости от назначения, сортамента применяемых обсадных труб шарошечные долота нормализованы по диаметрам.

Нормальный ряд шарошечных долот (по диаметрам) в соответствии с отраслевой нормалью Н554-61 предусматривает изготовление шарошечных долот следующих диаметров: 76, 93, 97, 112, 118, 132, 140, 145, 151, 161, 190, 214, 243, 269, 295, 320, 346, 370, 394, 445 и 490 *мм*. В табл. 13 приведены основные размеры шарошечных долот.

Шарошечные долота изготовляются двух групп:

— секционные (бескорпусные), у которых корпус сваривается из отдельных секций (лап); секционные долота имеют резьбовой

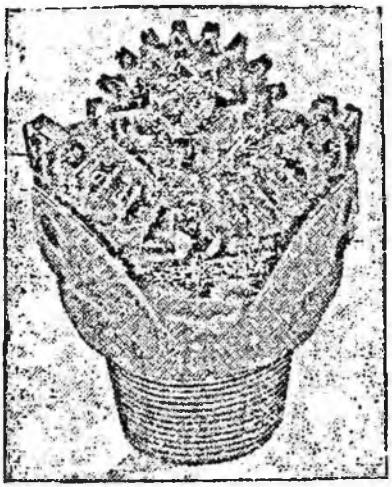


Рис. 7. Секционное (бескорпусное) трехшарошечное долото.

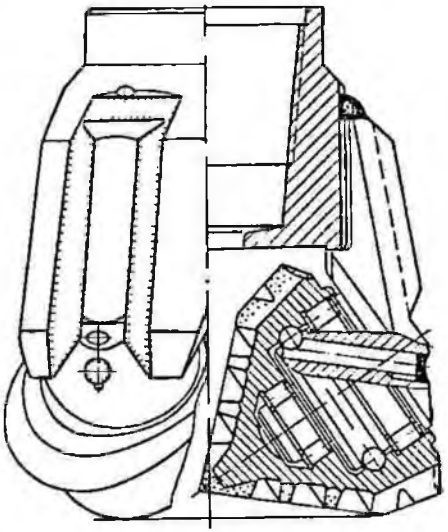


Рис. 8. Корпусное трехшарошечное долото.

присоединительный ниппель и изготовляются диаметром от 76 до 346 *мм* (рис. 7);

— корпусные долота, у которых корпус цельный литой с приваренными лапами; корпусные долота имеют присоединительную резьбовую муфту и изготовляются диаметром от 370 до 490 *мм* (рис. 8).

В соответствии с нормалью Н554-61 допускается изготовление шарошечных долот диаметром 370 и 394 *мм* с корпусом, свариваемым из отдельных секций (лап) и имеющим резьбовой ниппель.

В настоящее время серийно изготовляется 13 типов трехшарошечных долот, отличающихся геометрическими размерами и параметрами вооружения шарошек:

— долота типа М предназначены для бурения в самых мягких породах (насосы, глины, слабо сцементированные пески и т. п.);

Таблица 13

Номинальный диаметр долота, мм	Предельное отклонение диаметра долота, мм	Высота двух- и трехшарошечного долота, не более, мм	Высота одношарошечного долота, не более, мм	Диаметр корпуса долота, не более, мм	Тип резьбовой головки	Присоединительная резьба	Длина резьбового ниппеля, не менее, мм	Суммарное сечение промывочных каналов, см²	Допустимая нагрузка на долото, т	Вес долота не более, кг
46	+0,75	90	—	43	Ниппель	33 ГОСТ 8482—57	40	1,1	1,5	1,0
59		120		56		41,5 ГОСТ 8467—57	45		2,0	1,5
76		120		72		3—42 ГОСТ 918—64	50	1,7	3,5	2,0
93		150		90		3—50 ГОСТ 918—64	60	2,5	4,5	3,5
97		175	200	94		3—62 ГОСТ 5286—58	70		5,0	4,5
112		175	—	109		3—63,5 ГОСТ 7918—64	70			5,0
118		205		115		3—76 ГОСТ 5286—58	88	4,0	6,0	6,5
132	+1,0	200		128		3—63,5 ГОСТ 7918—64	70		7,0	8,0
140		235	285	136					10,0	12,0
145		235	—	141		3—88 ГОСТ 5286—58	96	6,0	12,0	13,0
151		245		147						14,0
161		245	306	157					15,0	16,0
172	+1,25	250		168		3—121 ГОСТ 5286—58	102	10,0	18,0	18,0
190		275	340	185					22,0	23,0
214		300	360	208				13,5	26,0	38,0
243		320	410	237				17,0	30,0	40,0
269		350	450	262		3—147 ГОСТ 5286—58	127		32,0	65,0
295	+1,5	380	—	287		3—152 ГОСТ 5286—58				81,0
320		400		310						107,0
346		445		335						128,0
370	+2,0	520		358		3—171 ГОСТ 5286—58		21,0	40,0	150,0
394		525		380						175,0
445		575		428						275,0
490		625		470						350,0

— долота типа МЗ предназначены для бурения в мягких абразивных породах (слабо сцементированные песчаники, мергель и т. п.);

— долота типа МС предназначены для бурения в мягких породах с пропластками пород средней твердости (мел с прослоями слабо сцементированных песчаников, каменная соль с прослоями ангидритов и т. п.);

— долота типа МСЗ предназначены для бурения в абразивных мягких породах с пропластками пород средней твердости (песчано-глинистые сланцы, плотные глины с прослоями песчаников и т. п.);

— долота типа С предназначены для бурения в породах средней твердости (плотные глины, глинистые сланцы, известняки средней твердости и т. п.);

— долота типа СЗ предназначены для бурения в абразивных породах средней твердости (песчаники, песчанистые сланцы и т. п.);

— долота типа СТ предназначены для бурения в породах средней твердости с пропластками твердых пород (песчаники с прослоями гипса, известняки с прослоями гипса, ангидриты, известняки средней твердости и т. п.);

— долота типа Т предназначены для бурения в твердых породах (плотные известняки, доломиты, доломитизированные известняки и т. п.);

— долота типа ТЗ предназначены для бурения в абразивных твердых породах (окварцованные известняки и доломиты, апатито-нефелиновые руды, серициты, диориты, перидотиты и т. п.);

— долота типа ТК предназначены для бурения в твердых породах с пропластками крепких пород (мелкокристаллические известняки и доломиты, серпентиниты и т. п.);

— долота типа ТКЗ предназначены для бурения в абразивных твердых породах с пропластками крепких пород (окварцованные известняки и доломиты и т. п.);

— долота типа К предназначены для бурения в абразивных крепких породах (вторичные кварциты, диабазы, порфириты и т. п.);

— долота типа ОК предназначены для бурения в очень крепких абразивных породах (амфиболиты, граниты, диабазы, кварциты, скарны, роговики, джеспилиты и т. п.).

Основные конструктивные особенности шарошечных долот

Вооружение шарошек долот типов М, МС, С, СТ, Т выполнено в виде выфрезерованных из тела шарошек зубцов призматической (клиновой) формы, боковые грани которых наплавлены зернистым твердым сплавом.

Вооружение шарошек долот типов МЗ, СЗ, ТЗ, ТКЗ, К, ОК выполнено в виде запрессованных в тело шарошек твердосплавных зубков (штырей) формы Г25 ГОСТ 880-62 с клиновидной формой рабочей поверхности (у долот типов МЗ, СЗ, ТЗ), формы Г20 ГОСТ 880-62 со сферической рабочей поверхностью (у долот типов К, ОК), чередующихся на каждом венце зубков формы Г25 и Г20 (долота типа ТКЗ),

Долота типа МСЗ изготовляются с комбинированным вооружением шарошек.

Также комбинированное вооружение шарошек имеют долота типа ТК, которые изготовляются по двум схемам вооружения шарошек:

— с выфрезерованными из тела шарошек зубьями, чередующимися на каждом венце с твердосплавными зубьями формы Г26;

— с твердосплавными зубьями формы Г26 только на периферийных венцах шарошек и выфрезерованными из тела шарошек зубьями на остальных венцах.

Рис. 9. Вооружение шарошечных долот с фрезерованными зубьями.

Вооружение шарошек зубчатых долот показано на рис. 9.

Оси шарошек долот типов М, МЗ, МС, МСЗ, С и СЗ имеют смещение в горизонтальной плоскости относительно оси долота.

Величина смещения осей шарошек составляет у долот типов М и МЗ до 10 *мм*; у долот типов МС, МСЗ, С и СЗ до 6 *мм* и зависит также от диаметра долота.

Шарошки долот типов М, МЗ, МС, МСЗ, С и СЗ имеют многоконусный контур.

Долота типов М и МЗ имеют максимальный вылет вершины первой шарошки за ось долота, высокие и длинные зубья, максимальный шаг зубьев.

У долот типов МС и МСЗ большее число зубьев, чем у долот типов М и МЗ, меньший их шаг и высота. Для улучшения калибровки ствола скважины зубья периферийных венцов одной или двух шарошек долот типа МС могут иметь Г-образную форму.

У долот типов С и СЗ шаг и высота зубьев меньше, чем у долот типов МС и МСЗ.

Долота типов СТ, Т, ТЗ, ТК ТКЗ, К и ОК выполнены без смещения осей шарошек относительно оси долота.

У долот типа СТ калибрующая поверхность зубьев периферийных венцов приближена к горизонтальной плоскости, проходящей через точку пересечения осей шарошек и долота. Шаг и высота зубьев значительно меньше, чем у долот типа С.

Зубья периферийных венцов на одной или двух шарошках выполнены Г-образной формы.

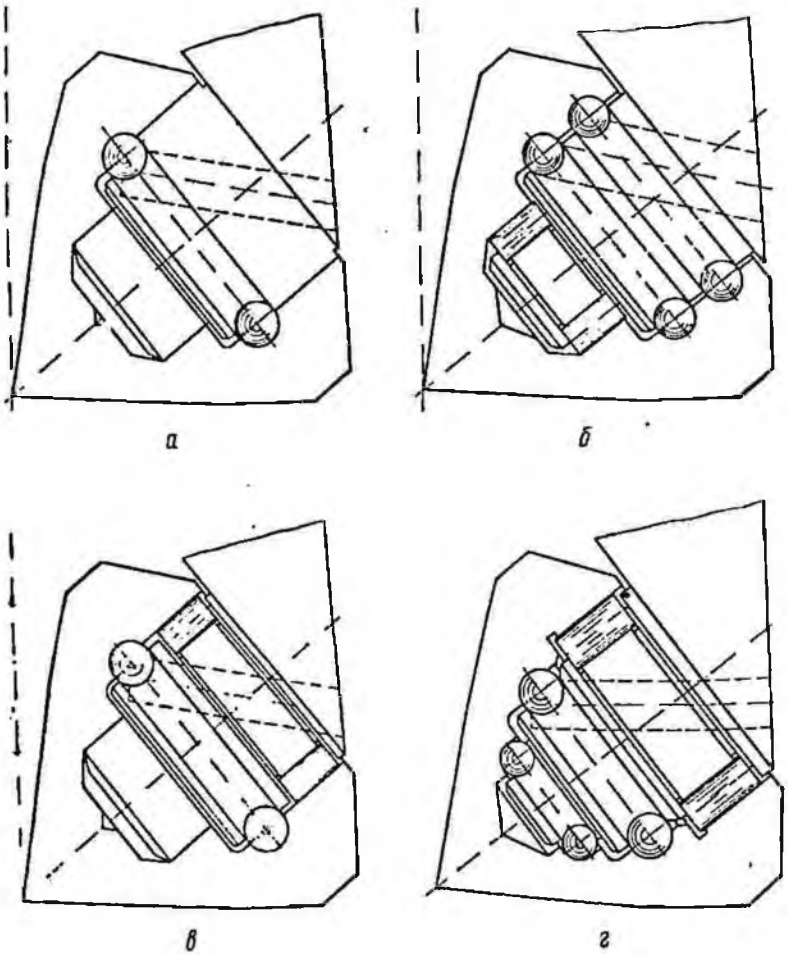
У долот типов Т, ТЗ, ТК, ТКЗ, К и ОК калибрующая поверхность зубьев (зубков) периферийных венцов находится на горизонтальной плоскости, проходящей через точку пересечения осей шарошек и долота, что исключает фрезерующее их воздействие на забой и способствует увеличению их износостойкости.

Таблица 14

Наименование долота	Тип долота	Номинальный диаметр долота, мм									
		46–118	132–151	161–190	214–269	295 и выше	46–118	132–151	161–190	214–269	295 и выше
		Угол наклона осей шарошек к оси долота					Смещение осей шарошек в направлении вращения долота				
Трехшарошечное	М МЗ МСЗ С СЗ	55°			57° 30′		4	5	6	8	10
							2	3	4	5	6
	СТ Т ТЗ ТК ТКЗ К ОК	52°					Не допускается				
Двухшарошечное	М	57° 30′		Не нормализуется			3	4	Не нормализуется		
	С	52°		То же			2	3	То же		
	Т К	50°		То же			Не допускается		То же		
Одношарошечное	СТ	30°				Не нормализуется	Не допускается				

У долот этих типов малый шаг и вылет зубьев (зубков). У долот типа Т зубья периферийных венцов двух шарошек имеют Т-образную форму.

Для уменьшения износа долот по диаметру поверхности обратных конусов шарошек долот типов М, МС, С, СТ, Т наплавляются



зерновым твердым сплавом, а долот типов МЗ, МСЗ, СЗ, ТК, ТЗ, ТКЗ, К и ОК армируются запрессованными заподлицо с телом шарошек твердосплавными зубьями с плоскими торцами.

Характеристики шарошечных долот различных типов приведены в табл. 14.

Шарошки долот смонтированы на подшипниках (опорах) цапф лап консольно.

В настоящее время шарошечные долота изготовляются со следующими схемами опор (подшипники указываются от периферийного к концевому, расположенному у оси долота):

— опоры долот диаметром от 76 *мм* до 145 *мм* выполняются по схеме: опора скольжения — шариковый подшипник — опора

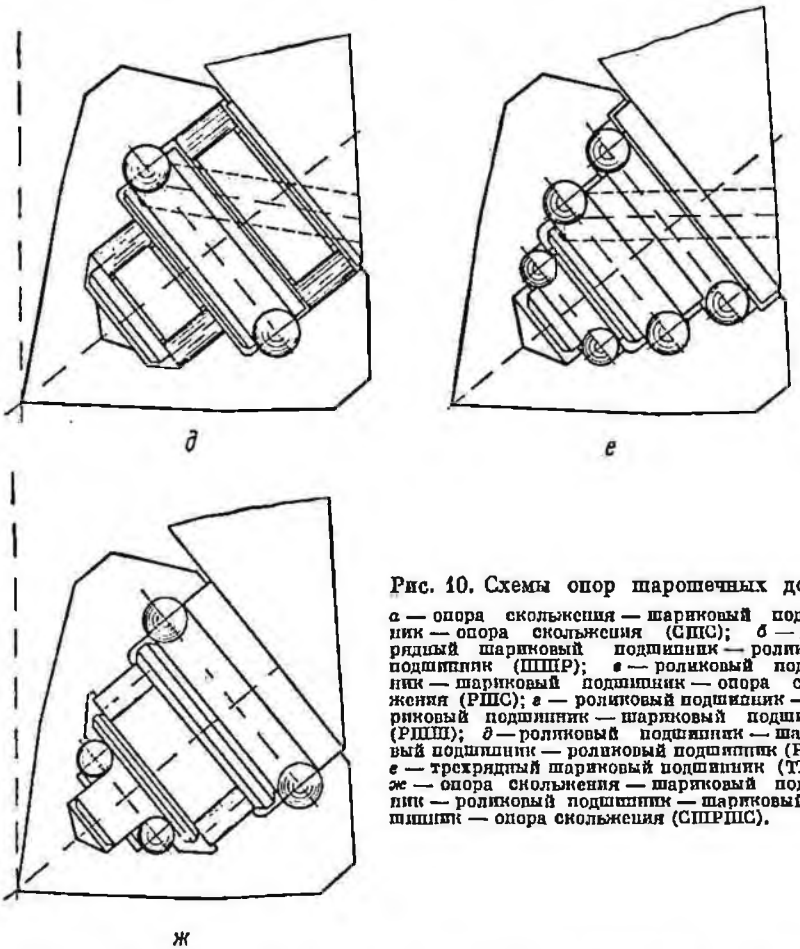


Рис. 10. Схемы опор шарошечных долот.

а — опора скольжения — шариковый подшипник — опора скольжения (СШС); *б* — двухрядный шариковый подшипник — роликовый подшипник (ШШР); *в* — роликовый подшипник — шариковый подшипник — опора скольжения (РШС); *г* — роликовый подшипник — шариковый подшипник — шариковый подшипник (РШШ); *д* — роликовый подшипник — шариковый подшипник — роликовый подшипник (РШР); *е* — трехрядный шариковый подшипник (ТШШ); *ж* — опора скольжения — шариковый подшипник — роликовый подшипник — шариковый подшипник — опора скольжения (СШРШС).

скольжения (СШС); шариковый подшипник одновременно является замковым, т. е. шариковый замок препятствует продольному перемещению шарошки по цапфе и снятию ее с цапфы; в настоящее время ведутся также экспериментальные исследования по применению этой схемы опор шарошек в долотах диаметром 161 и 190 *мм* (рис. 10,*а*);

— опоры долот диаметром 132, 140, 151, 161 и 190 *мм* некоторых типов выполнены по схеме: шариковый подшипник — шариковый подшипник — роликовый подшипник (ШШР); у долот с такой

схемой опоры, как правило, оба шариковых подшипника являются замковыми; в настоящее время проводятся экспериментальные исследования по применению этой схемы опоры в долотах диаметром 214 *мм* (рис. 10, *б*);

— опоры некоторых типов долот диаметром 140, 145 и 190 *мм* (последние — опытные) выполнены по схеме: роликовый подшипник — шариковый (замковый) подшипник — опора скольжения (РШС, рис. 10, *в*);

— некоторые типы долот диаметром 145 и 190 *мм* выполнены со схемой опор шарошек: роликовый подшипник — шариковый (замковый) — шариковый подшипник (РШШ, рис. 10, *г*);

— значительная часть типов долот диаметром 190 *мм*, а также практически всех типов долота диаметром от 214 до 490 *мм*, выполнены на опорах, имеющих схему: роликовый подшипник — шариковый (замковый) подшипник — роликовый подшипник (РШР, рис. 10, *д*);

— в настоящее время ведутся экспериментальные исследования по применению трехрядных шариковых опор (ШШШ) в долотах диаметром 190, 214, 243, 269 и 295 *мм* типов М, МЗ, МС, МСЗ, С, СЗ, предназначенных для турбинного бурения (рис. 10, *е*);

— в долотах диаметром 190 *мм*, изготовлявшихся Пермским заводом им. В. И. Ленина, применены пятирядные опоры: опора скольжения — шариковый (замковый) подшипник — роликовый подшипник — шариковый подшипник — опора скольжения (СШРШС); ведутся экспериментальные исследования по применению этой схемы опор шарошек в долотах диаметром 269 *мм* (рис. 10, *ж*).

Для подвода через долото к забою скважины рабочего агента, предназначенного для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы, в шарошечных долотах имеются специальные промывочные (продувочные) устройства, в зависимости от схемы которых шарошечные долота разделяются на три основные модели:

— с центральной промывкой, при которой промывочный агент через одно отверстие в центре долота, через щели или через три отверстия (в корпусе или промывочной плите) направляется на шарошки в центральную зону скважины;

— с боковой промывкой, при которой промывочный агент через промывочные отверстия, оснащенные сменными соплами (насадками), направляется между шарошками и периферийную зону забоя; долота с такой схемой промывки называются гидромониторными;

— с продувкой воздухом, газом или аэрированной жидкостью (воздушноводяной смесью), при которой часть потока через центральное отверстие в корпусе долота, снабженное насадкой (соплом), подается на шарошки, а часть потока по специальным каналам в лапах и их цапфах поступает в полость опор шарошек для их охлаждения и предотвращения попадания в них бурового шлама. По такой схеме продувочных устройств изготовляются долота диаметром 145, 190, 214, 243, 269 *мм* типов С, СТ, Т, ТЗ, ТК, ТКЗ, К и ОК, а также намечено изготовление долот этих же типов диаметром 295 и 320 *мм*.

Шифровка шарошечных долот

Шарошечные долота всех типов и размеров имеют шифр, порядковый заводской номер и дату изготовления, которые проставляются на торце присоединительного резьбового ниппеля или присоединительной резьбовой муфты.

На долотах диаметром от 76 *мм* до 118 *мм* допускается простановка шифра, заводского номера и даты изготовления на упорном торце ниппеля долота.

Для шифровки шарошечных долот заводам-изготовителям и научно-исследовательским организациям, разрабатывающим конструкции шарошечных долот, присвоены условные индексы: Бакинскому долотному заводу им. С. М. Кирова — Б, Верхне-Сергинскому долотному заводу — В, Сарапульскому долотному заводу им. Ф. Э. Дзержинского — Д, Куйбышевскому долотному заводу — К, ремонтно-механической базе Лениногорского полиметаллического комбината — Л, Пермскому машиностроительному заводу им. В.И.Ленина — М или ОМ, экспериментальному заводу ВНИИБТ — Н, Поваровскому опытному заводу — Р, Дрогобычскому долотному заводу — У, Саратовскому агрегатному заводу — АСГ, Восточно-Казахстанскому машиностроительному заводу — Ш.

Опытные, опытно-промышленные и первые промышленные партии шарошечных долот, изготовленные по чертежам ВНИИБТ на Экспериментальном заводе ВНИИБТ и Поваровском опытном заводе, в шифре имеют индекс Н. Опытно-промышленные партии шарошечных долот, а также серийные шарошечные долота, изготовленные на долотных (машиностроительных) заводах, в шифре имеют индекс соответствующего завода-изготовителя.

В шифре шарошечных долот также указываются порядковый номер модели и диаметр долота (в *мм*), тип долота.

В шифрах моделей шарошечных долот с боковой промывкой (гидромониторных) добавляется условный индекс Г.

В шифрах моделей шарошечных долот, предназначенных для бурения с продувкой воздухом, газом, аэрированной жидкостью (воздушноводяной смесью), добавляется условный индекс П. Пример шифровки долота: 7Н-190-ОКП, где 7 — порядковый номер модели (конструкции шарошечного долота данного типоразмера), в данном примере седьмая модель; Н — индекс, присвоенный заводу-изготовителю или организации, разработавшей конструкцию шарошечного долота (в данном примере — ВНИИБТ); 190 — диаметр шарошечного долота (в *мм*); ОК — тип шарошечного долота, определяемый его назначением и конструкцией вооружения его шарошек (в данном примере — штыревое шарошечное долото для очень крепких абразивных пород); П — для бурения с продувкой воздухом, газом и аэрированной жидкостью (воздушноводяной смесью).

В табл. 15 приведены шифры шарошечных долот, изготовляемых или подготовленных к изготовлению долотными заводами.

Таблица 15

Диаметр долота, мм	Шифр шарошечных долот типа М	МЗ	МС	МСЗ	С	СЗ
76	—	—	—	—	—	—
93	—	—	—	—	В-93С	—
97	—	—	—	—	В-97С У-97С	—
112	В-112МГ **	—	—	—	В-112С	—
118	—	—	—	—	В-118С	—
132	—	—	—	—	В-132С	—
140	—	—	—	—	В-140С	—
145	—	—	—	—	—	—
151 190	— 2В-190МГ В-190МГ	— В-190МЗГ *	— В-190МСГ	— АСГ-190МСЗГ * В-190МСЗГ *	В-151С ОМ-190С В-190С В-190СГ	— В-190СЗГ
214	Б-214МГ	Б-214МЗГ *	Б-214МСГ	Б-214МСЗГ *	Б-214С 2К-214СГ Б-214СГ	К-214СЗГ
243	Б-243МГ	Б-243МЗГ *	Б-243МСГ	—	Б-243С АСГ-243С Б-243СГ	—
269	Б-269МГ	Б-269МЗГ	Б-269МСГ	—	ОМ-269С Б-269С Б-269СГ	Б-269СЗГ *
295	У-295М У-295МГ	У-295МЗГ *	У-295МСГ	—	У-295С 1У-295СГ	У-295СЗГ
320	Д-320МГ	—	—	—	Д-320СГ 1Д-320СГ	—
346	Д-346МГ 3Д-346М	—	—	—	Д-346СГ 3Д-346С	—
394	Д-394МГ	—	—	—	Д-394СГ 2Д-394СГ Д-394СГ	—
445	Д-445МГ	—	—	—	Д-445СГ 3Д-445С	—
490	—	—	—	—	Д-490СГ 3Д-490С	—

* Опытно-промышленная партия долот.
** Двухшарошечные долота.

Продолжение табл. 15

Диаметр долота, мм	Шифр шарошечных долот типа СТ	Т	ТЗ	ТК	ТКЗ	К	ОК
76	—	Ш-76Т *	Ш-76ТЗ *	—	—	Ш-76К	Ш-760К
93	—	В-93Т	—	—	—	В-93К	—
97	—	В-97Т У-97Т	В-97ТЗ	—	—	—	В-970К
112	—	В-112Т	Ш-112ТЗ *	—	—	Ш-112К	Ш-1120К
118	—	В-118Т	В-118ТЗ	—	—	В-118К *	В-1180К *
132	—	В-132Т	—	—	—	В-132К	—
140	—	В-140Т	В-140ТЗ *	—	—	В-140К *	В-1400К *
	—	В-140Т ** 7В-140Т **	—	—	—	—	—
145	—	3В-145Т	Ш-145ТЗ *	—	—	Ш-145К	Л-1450К Ш-1450К *
151	—	В-151Т	—	—	—	В-151К	—
190	2В-190СТ В-190СТ В-190СТП	1В-190Т В-190ТП ОМ-190Т К-190КГ К-190ТП ОМ-190ТП 1В-190Т ОМ-190ТГ	К-190ТЗГ В-190ТЗ В-190ТЗП 2Н-190ТЗП	В-190ТК В-190ТКП ОМ-190ТК К-190ТКГ	В-190ТКЗ В-190ТКЗП	В-190К В-190КП ОМ-190К К-190КГ	ОМ-1900КП 7Р-1900КП К-1900КП
214	К-214СТ 2К-214СТП	К-214Т К-214ТГ К-214ТП	2К-214ТЗ 2К-214ТЗП	К-214ТК К-214ТКП	К-214ТКЗ К-214ТКЗП	К-214К 2К-214К	1К-2140КП 2К-2140КП
243	АСГ-243СТ У-243СТ	АСГ-243Т АСГ-243ТП У-243Т	У-243ТЗ * У-243ТЗП *	У-243ТК	—	У-243К АСГ-243К	3У-2430КП Р-2430КП
269	У-269СТ	ОМ-269Т ОМ-269ТП У-269Т У-269ТП	Н-269ТЗП * У-269ТЗ * У-269ТЗП *	ОМ-269ТК У-269ТК *	У-269ТКЗ *	ОМ-269К У-269К *	ОМ-2690КП 32Р-2690КП 3Р-2690КП * У-2690КП *
295	У-295СТ У-295СТГ	У-295Т У-295ТГ	У-295ТЗ * У-295ТЗП *	У-295ТК	—	У-295К	У-2950КП *
320	—	Д-320ТГ	—	—	—	—	Ш-3200КП * Р-3200КП *
346	—	Д-346ТГ 2Д-346Т	—	—	—	—	—
394	—	Д-394ТГ 2Д-394Т	—	—	—	—	—

* Опытно-промышленная партия долот,
** Одношарошечные долота.

Глава IV

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ШАРОШЕЧНОГО ДОЛОТА

Тип шарошечного долота и его размер определяет соотношение основных размерных параметров долота. Параметры эти связаны между собой математической зависимостью, однако некоторые характеристики долота — форма забоя, характер вооружения шарошек, зазоры между зубьями не имеют прямой зависимости от основных параметров. Для того чтобы долото правильно взаимодействовало с забоем и производило ожидаемый эффект разрушения, необходимо, чтобы основные параметры его были рассчитаны и обеспечили долоту запроектированную кинематику шарошек, соответствующую характеру процесса разрушения породы.

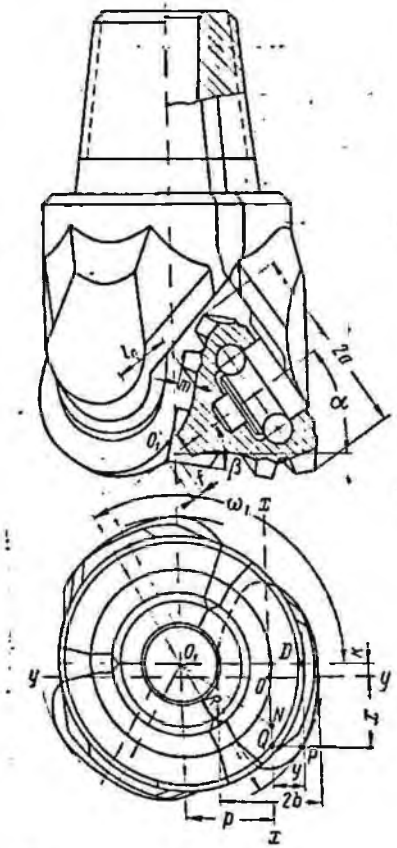


Рис. 11. Схема обработки стенки скважины шарошкой.

Основные параметры долота

1. Диаметр долота $D = 2R$ в *мм*.

2. Смещение осей шарошек относительно оси k в *мм*.

3. Угол наклона осей шарошек к плоскости, перпендикулярной к оси долота, α. Для удобства расчетов параметр этот задаем в виде величины ε, называемой эксцентриситетом эллипса проекции шарошки на горизонтальную

плоскость. При этом $\varepsilon = \cos\alpha$, что следует из определения эксцентриситета $\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$.

4. Наибольший диаметр венца шарошки, калибрующего стенку скважины, $2a$ в *мм*.

5. Расстояние от оси долота до центра эллипса наибольшего венца шарошки p. Параметры эти показаны на рис. 11. Величины R, α, k, p и a задаются конструкцией и размером долота. Между ними существует математическая зависимость, и по четырем из заданных параметров всегда можно определить пятый (при любом числе шарошек в долоте).

Общий порядок расчета основных геометрических размеров долота

1. В случае, если заданы α, k, p и a (рис. 11), диаметр долота определяется по формуле

$$2R = 2\sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2 x^2)} + 2\sqrt{p^2 + (k+\varepsilon^2 x)^2},$$

где

$$x = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{B_1 + B_2 - 2u + \frac{k^2}{\varepsilon^4}} + 2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{B_3^2 + 3\left(\frac{B_2 - B_1}{2}\right)^2} + B_3\right]}\right\} - \frac{k}{2\varepsilon^2}.$$

В случае, если

$$[(u^3 + v)^2 - u^6] > 0,$$

где

$$u = \frac{1}{3\varepsilon^4}[(1-\varepsilon^2)p^2 + k^2 - \varepsilon^4 a^2];$$

$$v = \frac{2(1-\varepsilon^2)p^2 a^2 k^2}{\varepsilon^8};$$

$$B_1 = \sqrt[3]{u^3 + v + \sqrt{(u^3+v)^2 - u^6}};$$

$$B_2 = \sqrt[3]{u^3 + v - \sqrt{(u^3+v)^2 - u^6}};$$

$$B_3 = \left(-\frac{B_1 + B_2}{2} - 2u + \frac{k^2}{\varepsilon^4}\right);$$

$$x = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{\mp 2u\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right] - 2u + \frac{k^2}{\varepsilon^4}} + \sqrt{\pm 2u\cos\left[60^\circ + \frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right] - 2u + \frac{k^2}{\varepsilon^4}} + \sqrt{\pm 2u\cos\left[60^\circ - \frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right] - 2u + \frac{k^2}{\varepsilon^4}}\right\} - \frac{k}{2\varepsilon^2};$$

если

$$[(u^3 + v)^2 - u^6] < 0.$$

В тех членах этого выражения, где указан двойной знак $\mp$ или $\pm$, верхний знак берется, когда $[u^3 + v] > 0$, а нижний, когда $[u^3 + v] < 0$.

Если $k = 0$ и u положительна, то $x = 0$ и

$$2R = 2a\sqrt{(1-\varepsilon^2)} + 2p.$$

Если $k = 0$ и u отрицательна, то

$$x = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon^4}\left[\varepsilon^4 a^2 - (1-\varepsilon^2)\,p^2\right]},$$

а

$$2R = 2(1-\varepsilon^2)\sqrt{a^2 + \frac{p^2}{\varepsilon^2}} + 2\varepsilon\sqrt{\varepsilon^2 a^2 + p^2} = 2\sqrt{a^2 + \frac{p^2}{\varepsilon^2}}.$$

Для примера приводится расчет диаметра долота с параметрами $\alpha = 35°$, $k = 4$ *мм*; $p = 58{,}77401$ *мм*, $a = 60{,}15$ *мм*. По этим заданным параметрам ведем расчет:

$$\varepsilon = \cos 35° = 0{,}81915,$$

$$u = \frac{1}{3 \cdot 0{,}81915^4}\left[(1-0{,}81915^2)\cdot 58{,}77401^3 + 4^2 - 0{,}81915^4 \cdot 60{,}15^2\right] = -352{,}8017,$$

$$v = \frac{2(1-0{,}81915^2)\,58{,}77401^2 \cdot 60{,}15^2 \cdot 4^2}{0{,}81915^8} = 649{,}0368 \cdot 10^6,$$

$$\left[(u^3+v)^2 - u^6\right] = \left[\left|(-3{,}528017 \cdot 10^2)^3 + 649{,}0368 \cdot 10^6\right|^2 - (3{,}528017 \cdot 10^2)^6\right] = 0{,}3642467 \cdot 10^{18} > 0,$$

$$B_1 = \sqrt[3]{(-3{,}528017 \cdot 10^2)^3 + 649{,}0368 \cdot 10^6 + \sqrt{0{,}3642467 \cdot 10^{18}}} = 1065{,}1829,$$

$$B_2 = \sqrt[3]{(-3{,}528017 \cdot 10^2)^3 + 649{,}0368 \cdot 10^6 - \sqrt{0{,}3642467 \cdot 10^{18}}} = 116{,}8429,$$

$$B_3 = \left[-\frac{1065{,}1829 + 116{,}8429}{2} + 2 \cdot 352{,}8017 + \frac{16}{0{,}81915^4}\right] = 150{,}1262,$$

$$x = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{1065{,}1829 + 116{,}8429 + 2 \cdot 352{,}8017 + \frac{16}{0{,}81915^4}} + 2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{150{,}1262^2 + 3\left(\frac{116{,}8429 - 1065{,}1829}{2}\right)^2} + 150{,}1262\right]}\right\} - \frac{4}{2 \cdot 0{,}81915^2} = 41{,}1388,$$

$$2R = 2\sqrt{(1-0{,}81915^2)\,(60{,}15^2 - 0{,}81915^2 \cdot 41{,}1388^2)} + 2\sqrt{58{,}77401^2 + (4 + 0{,}81915^2 \cdot 41{,}1388)^2} = 190{,}6202 \text{ мм}.$$

2. В случае, если по заданным α, k, a и R требуется определить p:

$$p=\sqrt{\left(R-\sqrt{(1-\varepsilon^2)\left(a^2-\varepsilon^2x^2\right)}\right)^2-(\varepsilon^2x+k)^2},$$

где

$$x=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{B_{1p}+B_{2p}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}+\right.$$

$$+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{B_{1p}+B_{2p}}{2}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right)^2+}\right.}\cdots\rightarrow$$

$$\left.\left.\rightarrow\cdots\overline{+3\left(\frac{B_{2p}-B_{1p}}{2}\right)^2}+\left(-\frac{B_{1p}+B_{2p}}{2}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right)\right]\right\}-$$

$$-\frac{k}{2}$$

в случае, если

$$[v_p^2+u_p^3]>0;$$

где

$$u_p=-\frac{1}{9}\left\{\frac{1}{\varepsilon^4}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]^2-\right.$$

$$\left.-\frac{3k^2}{\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2+\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right\};$$

$$v_p=\left\{\frac{1}{27\varepsilon^6}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]^3-\frac{k^2}{6\varepsilon^4}\left[2\left((1-\varepsilon^2)R^2-a^2\right)^2-\right.\right.$$

$$\left.\left.-3\left((1-\varepsilon^2)R^2+a^2\right)^2-\frac{\varepsilon^4k^4}{2}\right]\right\};$$

$$B_{1p}=\sqrt[3]{v_p+\sqrt{v_p^2+u_p^3}};$$

$$B_{2p}=\sqrt[3]{v_p-\sqrt{v_p^2+u_p^3}};$$

$$x=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{\mp 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{v_p}{|u_p|^{3/2}}\right]-}\cdots\rightarrow\right.$$

$$\rightarrow\cdots\overline{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]+}$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\right]-}\cdots\rightarrow$$

$$\rightarrow\cdots\overline{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]+}$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\right]-}\cdots\rightarrow$$

$$\left.\rightarrow\cdots\overline{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}\right\}-\frac{k}{2}$$

В тех членах этого выражения, где указан двойной знак $\mp$ или $\pm$, верхний знак берется, когда $[u^3 + v] > 0$, а нижний, когда $[u^3 + v] < 0$.

Если $k = 0$ и u положительна, то $x = 0$ и

$$2R = 2a\sqrt{(1-\varepsilon^2)} + 2p.$$

Если $k = 0$ и u отрицательна, то

$$x = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon^4}\left[\varepsilon^4 a^2 - (1-\varepsilon^2)\,p^2\right]},$$

а

$$2R = 2(1-\varepsilon^2)\sqrt{a^2 + \frac{p^2}{\varepsilon^2}} + 2\varepsilon\sqrt{\varepsilon^2 a^2 + p^2} = 2\sqrt{a^2 + \frac{p^2}{\varepsilon^2}}.$$

Для примера приводится расчет диаметра долота с параметрами $\alpha = 35°$, $k = 4$ *мм*; $p = 58{,}77401$ *мм*, $a = 60{,}15$ *мм*. По этим заданным параметрам ведем расчет:

$$\varepsilon = \cos 35° = 0{,}81915,$$

$$u = \frac{1}{3\cdot 0{,}81915^4}\left[(1-0{,}81915^2)\cdot 58{,}77401^2 + 4^2 - 0{,}81915^4 \cdot 60{,}15^2\right] = -352{,}8017,$$

$$v = \frac{2(1-0{,}81915^2)\,58{,}77401^2 \cdot 60{,}15^2 \cdot 4^2}{0{,}81915^8} = 649{,}0368\cdot 10^6,$$

$$\left[(u^3+v)^2 - u^6\right] = \left[\left|(-3{,}528017\cdot 10^2)^3 + 649{,}0368\cdot 10^6\right|^2 - (3{,}528017\cdot 10^2)^6\right] = 0{,}3642467\cdot 10^{16} > 0,$$

$$B_1 = \sqrt[3]{(-3{,}528017\cdot 10^2)^3 + 649{,}0368\cdot 10^6 + \sqrt{0{,}3642467\cdot 10^{16}}} = 1065{,}1829,$$

$$B_2 = \sqrt[3]{(-3{,}528017\cdot 10^2)^3 + 649{,}0368\cdot 10^6 - \sqrt{0{,}3642467\cdot 10^{16}}} = 116{,}8429,$$

$$B_3 = \left[-\frac{1065{,}1829 + 116{,}8429}{2} + 2\cdot 352{,}8017 + \frac{16}{0{,}81915^4}\right] = 150{,}1262,$$

$$x = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{1065{,}1829 + 116{,}8429 + 2\cdot 352{,}8017 + \frac{16}{0{,}81915^4}} + 2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{150{,}1262^2 + 3\left(\frac{116{,}8429 - 1065{,}1829}{2}\right)^2} + 150{,}1262\right]}\right\} - \frac{4}{2\cdot 0{,}81915^2} = 41{,}1388,$$

$$2R = 2\sqrt{(1-0{,}81915^2)\,(60{,}15^2 - 0{,}81915^2\cdot 41{,}1388^2)} + 2\sqrt{58{,}77401^2 + (4 + 0{,}81915^2\cdot 41{,}1388)^2} = 190{,}6202 \text{ мм}.$$

2. В случае, если по заданным α, k, a и R требуется определить p:

$$p=\sqrt{\left(R-\sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2x^2)}\right)^2-(\varepsilon^2x+k)^2},$$

где

$$x=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{B_{1p}+B_{2p}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}+\right.$$

$$+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{B_{1p}+B_{2p}}{2}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right)^2+}\right.}\cdots\to$$

$$\to\cdots\overline{\left.\left.+3\left(\frac{B_{2p}-B_{1p}}{2}\right)^2+\left(-\frac{B_{1p}+B_{2p}}{2}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right)\right]\right\}}-$$

$$-\frac{k}{2}$$

в случае, если

$$[v_p^2+u_p^3]>0;$$

где

$$u_p=-\frac{1}{9}\left\{\frac{1}{\varepsilon^4}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]^2-\right.$$

$$\left.-\frac{3k^2}{\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2+\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right\};$$

$$v_p=\left\{\frac{1}{27\varepsilon^6}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]^3-\frac{k^2}{6\varepsilon^4}\left[2\left((1-\varepsilon^2)R^2-a^2\right)^2-\right.\right.$$

$$\left.\left.-3\left((1-\varepsilon^2)R^2+a^2\right)^2-\frac{\varepsilon^4k^4}{2}\right]\right\};$$

$$B_{1p}=\sqrt[3]{v_p+\sqrt{v_p^2+u_p^3}};$$

$$B_{2p}=\sqrt[3]{v_p-\sqrt{v_p^2+u_p^3}};$$

$$x=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{\mp 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{v_p}{|u_p|^{3/2}}\right]-}\cdots\to\right.$$

$$\to\cdots\overline{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]+}$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\right]-}\cdots\to$$

$$\to\cdots\overline{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]+}$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\right]-}\cdots\to$$

$$\to\cdots\overline{\left.-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right\}}-\frac{k}{2}$$

(верхний знак берется, когда $v_p > 0$, а нижний, когда $v_p < 0$); в случае, если

$$[v_p^2 + u_p^3] < 0;$$

Если $k = 0$ и $[(1-\varepsilon^2)R^2 - a^2] > 0$, то $x = 0$ и $p = R - a\sqrt{(1-\varepsilon^2)}$.

Если $k = 0$ и $[(1-\varepsilon^2)R^2 - a^2] < 0$, то $x = \sqrt{3u_p}$, а

$$p = \sqrt{\left(R - \sqrt{(1-\varepsilon^2)\left[a^2 - \frac{1}{3\varepsilon^2}[(1-\varepsilon^2)R^2 - a^2]^2\right]}\right)^2 - \ldots} \rightarrow$$

$$\rightarrow \ldots - \frac{1}{3}[(1-\varepsilon^2)R^2 - a^2]^2}.$$

Для примера приводится расчет параметра p для долота с параметрами $\alpha = 35°$, $k = 4$ *мм*, $a = 44{,}0873$ *мм*, $R = 95$ *мм*. По этим заданным параметрам ведем расчет:

$$\varepsilon = \cos 35° = 0{,}81915,$$

$$u_p = -\frac{1}{9}\left\{\frac{1}{0{,}81915^4}\left[(1-0{,}81915^2)95^2 - 44{,}0873^2 - \frac{0{,}81915^2 \cdot 4^2}{2}\right]^2 - \right.$$

$$\left. - \frac{3 \cdot 4^2}{0{,}81915^2}\left[(1-0{,}81915^2)95^2 - 44{,}0873^2 + \frac{0{,}81915^2 \cdot 4^2}{2}\right]\right\} =$$

$$= -2{,}485627 \cdot 10^5,$$

$$v_p = \left\{\frac{1}{27 \cdot 0{,}81915^6}\left[(1-0{,}81915^2)^2 95^2 - 44{,}0873^2 - \frac{0{,}81915^2 \cdot 4^2}{2}\right]^3 - \right.$$

$$- \frac{4^2}{2 \cdot 0{,}81915^4}\left[2(1-0{,}81915^2)95^2 - 44{,}0873^2)^2 - 3((1-0{,}81915^2) \times \right.$$

$$\left. \times 95^2 + 44{,}0873^2)^2 - \frac{0{,}81915^4 \cdot 4^4}{2}\right]\Bigg\} = 5{,}465250 \cdot 10^8;$$

$$[v_p^2 + u_p^3] = 283332{,}468 \cdot 10^{16} > 0,$$

$$B_{1p} = \sqrt[3]{5{,}465250 \cdot 10^8 + \sqrt{283332{,}468}} = 1025{,}59,$$

$$B_{2p} = \sqrt[3]{5{,}465250 \cdot 10^8 - \sqrt{283332{,}468}} = 242{,}361,$$

$$x = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{1025{,}59 + 242{,}361 - \frac{2}{3 \cdot 0{,}81915^2}\left[(1 - 0{,}81915^2 \cdot 95^2 - \ldots\right.\right.} \rightarrow$$

$$\rightarrow \ldots - 44{,}0873^2 - \frac{0{,}81915^2 \cdot 4^2}{2}\Big] + 2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{1025{,}59 + 242{,}361}{2} - \right.\right.}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \ldots - \frac{2}{3 \cdot 0{,}81915^2}\left[(1-0{,}81915^2)95^2 - 44{,}0873^2 - \frac{0{,}81915^2 \cdot 4^2}{2}\right]\Big)^2 + \rightarrow$$

$$+3\left(\frac{242.361-1025.59}{2}\right)^2+\left(-\frac{1025.59+242.361}{2}-\frac{2}{3\cdot 0.81915^2}\times\right.$$

$$\left.\times\left[(1-0,81915^2)\,95^2-44,0873^2-\frac{0.81915^2\cdot 4^2}{2}\right]\right)\Bigg]-$$

$$-\frac{4}{2}=14,1661\ мм,$$

$$p=\sqrt{(95-\sqrt{(1-81915^2)(44,0873^2-0,81915^2\cdot 14,1661^2)})^2-}$$

$$-(0,81915^2\cdot 14,1661+4)^2=69,301\ мм.$$

3. В случае, если по заданным α, p, a и R требуется определить k:

где $$k=\sqrt{R^2-(p+y)^2}-\sqrt{a^2-\frac{y^2}{(1-e^2)}},$$

$$y=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{\mp 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}+\right.$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}-$$

$$\left.-\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}\right\}-\frac{B_1}{4};$$

в тех случаях, когда $B_6^2+B_5^3<0$. В членах этого выражения, где указан двойной знак $\pm$ или $\mp$, верхний знак берется, когда $B_6>0$, а нижний, когда $B_6<0$.

Если $B_6^2+B_5^3>0$

$$y=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{\Gamma_1+\Gamma_2-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}+\right.$$

$$+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)^2+\frac{3}{4}(\Gamma_2-\Gamma_1)^2}+\right.}$$

$$\left.\left.+\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)\right]\right\}-\frac{B_1}{4}.$$

Здесь

$$\Gamma_1=\sqrt[3]{-B_6+\sqrt{B_6^2+B_5^3}};$$

$$\Gamma_2=\sqrt[3]{-B_6-\sqrt{B_6^2+B_5^3}};$$

$$B_5=\left[\frac{B_1B_3}{3}-\frac{1}{9}B_2^2-\frac{4}{3}B_4\right];$$

$$B_6=\left[\frac{1}{6}B_1B_2B_3+\frac{4}{3}B_2B_4-\frac{1}{2}B_1^2B_4-\frac{1}{27}B_2^3-\frac{1}{2}B_3^2\right];$$

$$B_1 = 2p;$$

$$B_2 = \frac{1}{\varepsilon^2}\left[\varepsilon^2 p^2 + (1-\varepsilon^2)^2 a^2 - R^2\right];$$

$$B_3 = \frac{2}{\varepsilon^2}(1-\varepsilon^2)^2 a^2 p;$$

$$B_4 = \frac{(1-\varepsilon^2)^2}{\varepsilon^2} a^2 p^2.$$

Для примера приводится расчет величины k для долота с такими же параметрами, как в предыдущем случае: $\alpha = 35°$, $a = 44{,}0873$ *мм*, $p = 69{,}301$ *мм*, $R = 95$ *мм*. По этим данным ведем расчет:

$$B_1 = 2 \cdot 69{,}301 = 138{,}602,$$

$$B_2 = \frac{1}{0.81915^2}\left[0{,}81915^2 \cdot 69{,}301^2 + (1-0{,}81915^2)^2 \cdot 44{,}0873^2 - 95^2 = \right.$$

$$= -8333{,}6804,$$

$$B_3 = \frac{2}{0.81915^2}\left[1-0{,}81915^2\right]^2 \cdot 44{,}0873^2 \cdot 69{,}301 = 43460{,}48,$$

$$B_4 = \frac{(1-0.81915^2)^2}{0.81915^2} \cdot 44{,}0873^2 \cdot 69{,}301^2 = 1\,505\,927{,}36,$$

$$B_5 = \frac{138.602 \cdot 43460.48}{3} - \frac{8333.6804^2}{9} - \frac{4 \cdot 1505927.36}{3} = -7{,}71669 \cdot 10^6,$$

$$B_6 = -\frac{138.602 \cdot 8333.6804 \cdot 43460.48}{6} - \frac{4 \cdot 8333.6804 \cdot 1505927.36}{3} -$$

$$- \frac{138.602^2 \cdot 1\,505\,927.36}{2} + \frac{8333.6804^3}{27} - \frac{43460.48^2}{2} = -1{,}907291 \cdot 10^{10},$$

$$B_6^2 + B_5^3 = 1{,}907291^2 \cdot 10^{20} - 7{,}71669^3 \cdot 10^{18} = -95{,}738011 \cdot 10^{18} < 0,$$

$$y = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{2\sqrt{|7{,}71669 \cdot 10^6|}} \cdot \cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|1.907291 \cdot 10^{10}|}{|7.71669 \cdot 10^6|^{3/2}}\right] + \right.$$

$$+ \frac{2}{3}\left[8333{,}68 + \frac{3 \cdot 138.602^2}{8}\right] + \sqrt{-2\sqrt{|7{,}71669 \cdot 10^6|}} \times$$

$$\times \cos\left[60° - \frac{1}{3}\arccos\frac{|1.907291 \cdot 10^{10}|}{|7.71669 \cdot 10^6|^{3/2}}\right] +$$

$$+ \frac{2}{3}\left[8333{,}68 + \frac{3 \cdot 138.602^2}{8}\right] -$$

$$\left. - \sqrt{-2\sqrt{|7{,}71669 \cdot 10^6|}} \cdot \cos\left[60° + \frac{1}{3}\arccos\frac{|1.907291 \cdot 10^{10}|}{|7.71669 \cdot 10^6|^{3/2}}\right] + \right.$$

$$+\frac{2}{3}\left[8333{,}68+\frac{3\cdot 138{,}602^2}{8}\right]\Bigg\}-\frac{138{,}602}{4}=23{,}946\ мм,$$

$$k=\sqrt{95^2-(69{,}301+23{,}946)^2}-\sqrt{44{,}0873^2-\frac{23{,}946^2}{(1-0{,}81915^2)}}=4{,}07\ мм.$$

Вывод зависимостей между величинами, определяющими размер и конструкцию долота

Эллипс, являющийся проекцией наибольшего венца шарошки, образующего стенку скважины, разбуриваемой долотом, может быть выражен уравнением (центр координат находится в центре эллипса)

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{a^2\sin^2\alpha}=1. \qquad (IV.1)$$

Заменяя величину α через ε, имеем $\sin^2\alpha=1-\varepsilon^2$; и из уравнения (IV.1)

$$y^2=(1-\varepsilon^2)(a^2-x^2). \qquad (IV.2)$$

Зависимость между R и остальными параметрами долота можно определить из рис. 11:

$$(x+k)^2+(y+p)^2=R^2$$

или

$$y^2+2py+x^2+2kx+k^2+p^2-R^2=0. \qquad (IV.3)$$

Нетрудно установить, что выражение (IV.3) представляет собой уравнение окружности, центр которой находится в точке с координатами

$$x=-k, \quad y=-p.$$

Точка шарошки, калибрующая стенку скважины, должна быть в точке пересечения эллипса венца шарошки и окружности скважины, т. е. в точке с координатами x и y. Так как в этой точке эллипс шарошки и окружность скважины должны касаться, то производные уравнений (IV.2) и (IV.3) должны быть равны.

Из уравнения (IV.2) следует

$$\frac{dy}{dx}=-(1-\varepsilon^2)\frac{x}{y}.$$

Из уравнения (IV.3) следует

$$\frac{dy}{dx}=-\frac{x+k}{y+p}$$

или

$$\frac{x+k}{y+p}=(1-\varepsilon^2)\frac{x}{y}.$$

После подстановки в это равенство значение y из уравнения (IV.2) получается уравнение 4-й степени, из которого можно определить x:

$$x^4+\frac{2k}{\varepsilon^2}x^3+\left[\frac{(1-\varepsilon^2)}{\varepsilon^4}p^2+\frac{k^2}{\varepsilon^4}-a^2\right]x^2-\frac{2a^2k}{\varepsilon^2}x-\frac{a^2k^2}{\varepsilon^4}=0. \quad \text{(IV.4)}$$

Находим корень этого уравнения заменой неизвестного x на величину

$$x=x'-\frac{k}{2\varepsilon^2}.$$

Уравнение (IV.4) приводится к уравнению, не содержащему члена с x^3:

$$x'^4+\frac{1}{\varepsilon^4}\left[(1-\varepsilon^2)p^2-\frac{k^2}{2}-\varepsilon^4a\right]x'^2-\frac{1}{\varepsilon^6}[(1-\varepsilon^2)kp^2+\varepsilon^4a^2k]x'+$$
$$+\frac{1}{16\varepsilon^8}[4(1-\varepsilon^2)k^2p^2+k^4-4\varepsilon^4a^2k^2]=0. \quad \text{(IV.5)}$$

Если представить уравнение (IV.5) в схематическом виде

$$x'^4+A_1x'^2-A_2x'+A_3=0,$$

то для нахождения его корней необходимо решить следующее уравнение третьей степени:

$$x''^3+2A_1x''^2+[A_1^2-4A_3]x''-A_2^2=0.$$

Подставляя в это уравнение вместо условных коэффициентов A_1, A_2 и A_3 значения из уравнения (IV.5), получаем

$$x''^3+\frac{2}{\varepsilon^4}\left[(1-\varepsilon^2)p^2-\frac{k^2}{2}-\varepsilon^4a^2\right]\cdot x''^2+\frac{1}{\varepsilon^8}[|(1-\varepsilon^2)p^2-\varepsilon^4a^2|^2-$$
$$-2k^2|(1-\varepsilon^2)p^2-\varepsilon^4a^2|]x''-\frac{k^2}{\varepsilon^{12}}|(1-\varepsilon^2)p^2+\varepsilon^4a^2|^2=0. \quad \text{(IV.6)}$$

Для нахождения корней уравнения (IV.6) составим приведенное уравнение, не содержащее члена с неизвестным 2-й степени. Для этого сделаем замену неизвестного

$$x''=x'''-\frac{2}{3\varepsilon^4}\left[(1-\varepsilon^2)p^2-\frac{k^2}{2}-\varepsilon^4a^2\right]. \quad \text{(IV.7)}$$

Указанной заменой неизвестного уравнение (IV.6) приводится к приведенному кубическому уравнению

$$x'''^3-\frac{1}{3\varepsilon^8}[(1-\varepsilon^2)p^2-\varepsilon^4a^2+k^2]^2x'''-2\left[\frac{1}{27\varepsilon^{12}}|(1-\varepsilon^2)p^2-\right.$$
$$\left.-\varepsilon^4a^2+k^2|^3+\frac{2(1-\varepsilon^2)p^2a^2k^2}{\varepsilon^8}\right]=0. \quad \text{(IV.8)}$$

Обозначая для упрощения величину

$$\frac{1}{3\varepsilon^4}[(1-\varepsilon^2)p^2+k^2-\varepsilon^4a^2]=u, \quad \text{(IV.9)}$$

перепишем уравнение (IV.8):

$$x'''^{3} - 3u^2x''' - 2\left[u^3 + \frac{2(1-\varepsilon^2)p^2a^2k^2}{\varepsilon^8}\right] = 0. \qquad \text{(IV.10)}$$

Введем также обозначение

$$v = \frac{2(1-\varepsilon^2)p^2a^2k^2}{\varepsilon^8}. \qquad \text{(IV.11)}$$

Тогда уравнение (IV.8) запишется так:

$$x'''^{3} - 3u^2x''' - 2(u^3+v) = 0. \qquad \text{(IV.12)}$$

Корни уравнения (IV.12) определяются по формулам Кардана:

$$x_1''' = \sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}} + \sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}},$$

$$x_2''' = \frac{(-1+i\sqrt{3})}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}} + \frac{(-1-i\sqrt{3})}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^3-u^6}},$$

$$x_3''' = \frac{(-1-i\sqrt{3})}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}} + \frac{(-1+i\sqrt{3})}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}.$$

Далее определяются корни полного кубического уравнения (IV.6). Выражение (IV.7) с учетом обозначения (IV.9) может быть выражено так

$$x' = x''' - 2u + \frac{k^2}{\varepsilon^4}.$$

Тогда корни уравнения (IV.6) будут равны:

$$x_1' = \sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}} + \sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}} - 2u + \frac{k^2}{\varepsilon^4}, \qquad \text{(IV.13)}$$

$$x_2' = -\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}} - \frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}} - 2u + \frac{k^2}{\varepsilon^4} + i\sqrt{3}\left[\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}} - \frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}\right], \qquad \text{(IV.14)}$$

$$x_3''=-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-$$
$$-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}+$$
$$+i\sqrt{3}\left[\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-\right.$$
$$\left.-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}\right]. \qquad \text{(IV.15)}$$

Корни приведенного уравнения 4-й степени (IV.5) определяются следующим образом:

$$x_1'=\frac{1}{2}(\sqrt{x_1''}+\sqrt{x_2''}+\sqrt{x_3''}), \qquad \text{(IV.16)}$$

$$x_2'=\frac{1}{2}(-\sqrt{x_1''}+\sqrt{x_2''}-\sqrt{x_3''}), \qquad \text{(IV.17)}$$

$$x_3'=\frac{1}{2}(\sqrt{x_1''}-\sqrt{x_2''}-\sqrt{x_3''}), \qquad \text{(IV.18)}$$

$$x_4'=\frac{1}{2}(-\sqrt{x_1''}-\sqrt{x_2''}+\sqrt{x_3''}). \qquad \text{(IV.19)}$$

Как видно из выражений (IV.14) и (IV.15), корни x_2'' и x_3'' являются комплексными величинами, причем мнимые части их равны, но имеют противоположные знаки. Следовательно, величины x_2'' и x_4', в которых значения x_2'' и x_3'' имеют противоположные знаки и мнимые части при этом складываются, будут комплексными и должны быть отброшены. Корни же x_1' и x_3', содержащие, как видно из выражений (IV.16) и (IV.18), величины x_2'' и x_3'', мнимые части которых при сложении уничтожаются, будут действительными. Сказанное поясняется следующим образом. Если имеется под знаком радикала комплексное число

$$\sqrt{A_1\pm A_2 i},$$

то, как известно,

$$\sqrt{A_1\pm A_2 i}=\sqrt{\frac{1}{2}\sqrt{(A_1^2+A_2^2+A_1)}}\pm i\sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{A_1^2+A_2^2}-A_1)}.$$

При сложении двух величин, у которых мнимые части под корнем имеют разные знаки, получается суммарная действительная величина.

Таким образом, корни x_1' и x_2' запишутся следующим образом:

$$x_1'=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{x_1'''-2u-\frac{k^2}{\varepsilon^4}}+\right.$$
$$\left.+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{1}{2}x_1'''-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)^2}+\right.}\right.$$

$$+\frac{3}{4}\left(\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-\right.$$

$$\left.-\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}\right)^2+\left(-\frac{1}{2}x_1'''-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)\Bigg]\Bigg\},$$

$$x_3'=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{x_1'''-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}-2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{1}{2}x_1'''-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)^2+}\right.}\right.$$

$$+\frac{3}{4}\left(\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-\right.$$

$$\left.\left.-\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}\right)^2+\left(-\frac{1}{2}x_1'''-2u+\frac{k}{\varepsilon^4}\right)\right]\Bigg\}.$$

Имея значение корней приведенного уравнения (IV.5), можно написать выражения для корней уравнения (IV.4):

$$x_1=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}+\right.$$

$$+\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}+$$

$$+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-\right.\right.}$$

$$\left.-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)^2+$$

$$+\frac{3}{4}\left(\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v^2)^2-u^6}}-\right.$$

$$\left.-\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}\right)^2+$$

$$+\left(-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-\right.$$

$$\left.\left.-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)\right]\Bigg\}-\frac{k}{2\varepsilon^2},$$

$$x_2=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}+\right.$$

$$+\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}-$$

$$-2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-\right.\right.}$$

$$\sqrt{-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}^2+\sqrt{+\frac{3}{4}\left(\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}\right)^2+\sqrt{+\left(-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-\sqrt{-\frac{1}{2}\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}\right)\Bigg]}}}-\frac{k}{2\varepsilon^2}.$$

Для упрощения написания этих формул введем следующие обозначения:

$$\sqrt[3]{u^3+v+\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}=B_1, \tag{IV.20}$$

$$\sqrt[3]{u^3+v-\sqrt{(u^3+v)^2-u^6}}=B_2. \tag{IV.21}$$

Тогда значения корней уравнения (IV.4) могут быть записаны так:

$$x_1=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{B_1+B_2-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{B_1-B_2}{2}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)^2+\sqrt{+3\left(\frac{B_2-B_1}{2}\right)^2+\left(-\frac{B_1+B_2}{2}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)}}\right]}\right\}-\frac{k}{2\varepsilon^2}, \tag{IV.22}$$

$$x_2=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{B_1+B_2-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}-2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{B_1+B_2}{2}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)^2+\sqrt{+3\left(\frac{B_2-B_1}{2}\right)^2+\left(-\frac{B_1+B_2}{2}-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}\right)}}\right]}\right\}-\frac{k}{2\varepsilon^2}. \tag{IV.23}$$

В случае, если величина $[(u^3+v)^2-u^6]<0$ или

$$\left(\left\{\frac{1}{3\varepsilon^4}[(1-\varepsilon^2)p^2+k^2-\varepsilon^4a^2]\right\}^3+\frac{2(1-\varepsilon^2)p^2a^2k^2}{\varepsilon^8}\right)^2<$$

$$<\left\{\frac{1}{3\varepsilon^4}[(1-\varepsilon^2)p^2+k^2-\varepsilon^4a^2]\right\}^6,$$

Все три корня уравнения (IV.12) получают мнимую форму, тогда как они действительны. В этом случае прибегаем к три-

гонометрическому решению. Корни уравнения (IV.12) будут равны:

$$x_1''' = +2\sqrt{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right],$$

$$x_2''' = -2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right],$$

$$x_3''' = -2\sqrt{u}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right].$$

Как известно, в этих формулах в подкоренных выражениях ставится только абсолютная величина u, поэтому, учитывая, что в зависимости от соотношения параметров e, p, k и a u может быть как положительным, так и отрицательным, но величина u^2 в уравнении (IV.12) может быть только положительной, нельзя величину $\sqrt{u^2}$ заменить на u и $\sqrt{u^6}$ на u^3, так как тогда получились бы мнимые величины при u, имеющих отрицательные значения. Корни уравнения (IV.6) в этом случае примут вид

$$x_1'' = +2\sqrt{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4},$$

$$x_2'' = -2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4},$$

$$x_3'' = -2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4}.$$

Корни приведенного уравнения 4-й степени (IV.5) при этом запишутся так:

$$x_1' = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{+2\sqrt{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4}}+\right.$$

$$+\sqrt{-2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4}}+$$

$$\left.+\sqrt{-2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4}}\right\},$$

$$x_2' = \frac{1}{2}\left\{-\sqrt{+2\sqrt{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4}}+\right.$$

$$+\sqrt{-2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4}}-$$

$$\left.-\sqrt{-2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{e^4}}\right\},$$

$$x_3'=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{+2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}-\right.$$

$$-\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}-$$

$$\left.-\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}\right\},$$

$$x_4'=\frac{1}{2}\left\{-\sqrt{+2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}-\right.$$

$$-\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}+$$

$$\left.+\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}\right\}.$$

Значения корней уравнения (IV.4) при этом напишутся так:

$$x_1=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{+2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}+\right.$$

$$+\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}+$$

$$\left.+\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}\right\}-\frac{K}{2\varepsilon^2},\quad\text{(IV.24)}$$

$$x_2=\frac{1}{2}\left\{-\sqrt{+2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}+\right.$$

$$+\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}-$$

$$\left.-\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}\right\}-\frac{k}{2\varepsilon^2},\quad\text{(IV.25)}$$

$$x_3=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{+2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}-\right.$$

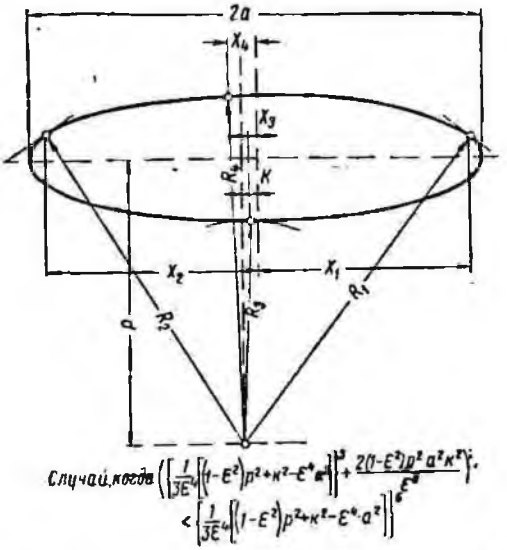
$$-\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}+$$

$$\left.+\sqrt{-2\sqrt[3]{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}\right\}-\frac{k}{2\varepsilon^2},\quad\text{(IV.26)}$$

$$x_4=\frac{1}{2}\left\{-\sqrt{+2\sqrt{u^2}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}-\right.$$

$$-\sqrt{-2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}+$$

$$\left.+\sqrt{-2\sqrt{u^2}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{u^3+v}{\sqrt{u^6}}\right]-2u+\frac{k^2}{\varepsilon^4}}\right\}-\frac{k}{2\varepsilon^2}. \quad \text{(IV.27)}$$



Случай, когда $\left\{\left[\frac{1}{3\varepsilon^4}\left[(1-\varepsilon^2)p^2+\kappa^2-\varepsilon^4a^2\right]\right]^3+\frac{2(1-\varepsilon^2)p^2a^2\kappa^2}{\varepsilon^8}\right\}^2 <$
$< \left\{\left[\frac{1}{3\varepsilon^4}\left[(1-\varepsilon^2)p^2+\kappa^2-\varepsilon^4\cdot a^2\right]\right]^3\right\}^2$

Рис. 12. Случай четырех действительных корней.

Для определения радиуса R воспользуемся известными величинами для эллипса (рис. 11), у которого нормаль $PN = \sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2x^2)}$, поднормаль $NQ = (1-\varepsilon^2)x$.

Из этих выражений можно написать

$$PO_1 = R = PN + NO_1 = \sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2x^2)} + \sqrt{p^2+(k+\varepsilon^2x)^2}. \quad \text{(IV.28)}$$

Таким образом, в случае, когда $[(u^3+v)^2-u^6]>0$, могут быть две окружности, имеющие общую касательную с эллипсом венца шарошки и, следовательно, два значения радиуса R. В случае, когда $[(u^3+v)^2-u^6]<0$, могут быть четыре таких окружности и четыре значения радиуса R.

Геометрический смысл этого показан на рис. 12 и 13. Анализируя значение корней уравнения (IV.4), можно установить, что в случае, показанном на рис. 12, наибольшее значение из корней будет иметь x_1 по формуле (IV.24), а в случае, показанном на рис. 13, наибольшее

значение будет иметь x_1 по формуле (IV.22). Так как формула (IV.28) показывает, что чем больше x, тем больше R, то радиус скважины, разбуриваемой долотом, будет равен:

$$R=\sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2x_1^2)}+\sqrt{p^2+(k+\varepsilon^2x_1)^2}. \qquad \text{(IV.29)}$$

Если в уравнение (IV.28) подставить величины наименьших значений корней x, то получится формула для определения радиуса керна, образуемого данным долотом и обуриваемого соответствующим вещом.

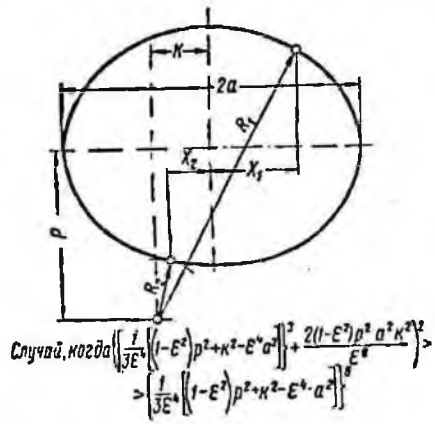


Рис. 13. Случай двух действительных корней.

Если $k=0$, формулы, определяющие R долота, значительно упрощаются.

Так, подставив в формулы (IV.22) и (IV.23) вместо k его значение нуль, при положительном u получим $x_1=0$ и $x_2=0$.

Находим значение величины R из формулы (IV.29):

$$R_1=+\sqrt{(1-\varepsilon^2)a^2}+\sqrt{p^2}, \qquad \text{(IV.30)}$$

$$R_2=-\sqrt{(1-\varepsilon^2)a^2}+\sqrt{p^2}. \qquad \text{(IV.31)}$$

Отрицательные значения корней из p^2 $(-\sqrt{p^2})$ при этом во внимание не принимаем, так как они противоречат заданным условиям. Если величина u отрицательна и $k=0$, получим

$$x_1=\sqrt{[3u]}, \quad x_2=-\sqrt{[3u]}.$$

Значения величины R при этом будут равны из формулы (IV.29):

$$R_1=(1-\varepsilon^2)\sqrt{a^2+\frac{p^2}{\varepsilon^2}}+\varepsilon\sqrt{\varepsilon^2a^2+p^2}=\sqrt{a^2+\frac{p^2}{\varepsilon^2}}. \qquad \text{(IV.32)}$$

При $x_3=x_4=0$

$$R_2=\pm\sqrt{(1-\varepsilon^2)a^2}+p. \qquad \text{(IV.33)}$$

При подстановке в формулы (IV.24), (IV.25), (IV.26), (IV.27) значений $k=0$ имеем

$$x_1=\sqrt{[3u]},$$

$$x_2=0,$$

$$x_3 = -\sqrt{[3u]},$$

$$x_4 = 0.$$

При подстановке этих значений в выражение (IV.29) получаем формулы (IV.30), (IV.31), (IV.32) и (IV.33), которые были получены из выражений (IV.22) и (IV.23).

Определение величины p по заданным параметрам

Рассматривая рис. 11, видим, что треугольник O_1PD подобен треугольнику PNQ. Следовательно,

$$\frac{O_1P}{PN} = \frac{PD}{QN}.$$

Так как $O_1P = R$ — радиус окружности, $PN = \sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2x^2)}$ — нормаль эллипса, $ON = (1-\varepsilon^2)x$ — поднормаль эллипса, $PD = x+k$, то

$$\frac{R}{\sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2x)}} = \frac{x+k}{(1-\varepsilon^2)x},$$

следовательно,

$$x^4 + 2kx^3 + \frac{1}{\varepsilon^2}[(1-\varepsilon^2)R^2 - a^2 + \varepsilon^2k^2]x^2 - \frac{2}{\varepsilon^2}a^2kx - \frac{1}{\varepsilon^2}a^2k^2 = 0. \qquad \text{(IV.34)}$$

Нахождение корней этого уравнения производится по такой же методике, как для уравнения (IV. 4).

Обозначаем для упрощения величины

$$-\frac{1}{9}\left\{\frac{1}{\varepsilon^4}\left[(1-\varepsilon^2)R^2 - a^2 - \frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]^2 - \right.$$

$$\left. -\frac{3k^2}{\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2 - a^2 + \frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right\} = u_p, \qquad \text{(IV.35)}$$

$$\left\{\frac{1}{27\varepsilon^6}\left[(1-\varepsilon^2)R^2 - a^2 - \frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]^3 - \frac{k^2}{6\varepsilon^4}\left[2((1-\varepsilon^2)R^2 - a^2)^2 - \right.\right.$$

$$\left.\left. -3((1-\varepsilon^2)R^2 + a^2)^2 - \frac{\varepsilon^4k^4}{2}\right]\right\} = v_p, \qquad \text{(IV.36)}$$

$$\sqrt[3]{v_p + \sqrt{v_p^2 + u_p^3}} = B_{p_1}, \qquad \text{(IV.37)}$$

$$\sqrt[3]{v_p - \sqrt{v_p^2 + u_p^3}} = B_{p_2}. \qquad \text{(IV.38)}$$

Значения x для случая, если $[v_p^2 + u_p^3] > 0$, напишутся так (для действительных корней):

$$x_1 = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{B_{1p}+B_{2p}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}+\right.$$

$$+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{B_{1p}+B_{2p}}{2}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right)^2}+\right.}$$

$$\left.\left.+3\left(\frac{B_{2p}-B_{1p}}{2}\right)^2+\left(-\frac{B_{1p}+B_{2p}}{2}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right)\right]\right\}-\frac{k}{2}, \quad \text{(IV.39)}$$

$$x_2 = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{B_{1p}+B_{2p}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}-\right.$$

$$-2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{B_{1p}+B_{2p}}{2}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right)^2}+\right.}$$

$$\left.\left.+3\left(\frac{B_{2p}-B_{1p}}{2}\right)^2+\left(-\frac{B_{1p}+B_{2p}}{2}-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]\right)\right]\right\}-\frac{k}{2}. \quad \text{(IV.40)}$$

В случае, если величина

$$[v_p^2+u_p^3]<0,$$

значения x запишутся так:

$$x_1 = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{\mp 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\right.}\right.$$

$$-\left.\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}+\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\right]}-$$

$$-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}+\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[60^\circ-\right.}$$

$$\left.\left.-\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|v_p|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}\right\}-\frac{k}{2}, \quad \text{(IV.41)}$$

$$x_2 = \frac{1}{2}\left\{-\sqrt{\mp 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\right]-}\right.\ldots$$

$$\ldots-\frac{2}{3\varepsilon^2}\left[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\right]}+\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\left[60^\circ+\right.}\ldots$$

$$\rightarrow\cdots\sqrt{+\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\Big]-\frac{2}{3\varepsilon^2}\Big[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\Big]}-$$

$$-\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\Big[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\Big]-}\rightarrow\cdots$$

$$\rightarrow\cdots\sqrt{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\Big[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\Big]}\Big\}-\frac{k}{2}, \qquad \text{(IV.42)}$$

$$x_3=\frac{1}{2}\Big\{\sqrt{\mp 2\sqrt{|u_p|}\cos\Big[\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\Big]-}\rightarrow\cdots$$

$$\rightarrow\cdots\sqrt{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\Big[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\Big]}-\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\Big[60^\circ+}\rightarrow\cdots$$

$$\rightarrow\cdots\sqrt{+\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\Big]-\frac{2}{3\varepsilon^2}\Big[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\Big]}-$$

$$-\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\Big[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\Big]-}\rightarrow\cdots$$

$$\rightarrow\cdots\sqrt{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\Big[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\Big]}\Big\}-\frac{k}{2}, \qquad \text{(IV.43)}$$

$$x_4=\frac{1}{2}\Big\{-\sqrt{\mp 2\sqrt{|u_p|}\cos\Big[\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\Big]-}\rightarrow\cdots$$

$$\rightarrow\cdots\sqrt{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\Big[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\Big]}-\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\Big[60^\circ+}\rightarrow\cdots$$

$$\rightarrow\cdots\sqrt{+\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\Big]-\frac{2}{3\varepsilon^2}\Big[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\Big]}+$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|u_p|}\cos\Big[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|v_p|}{|u_p|^{3/2}}\Big]-}\rightarrow\cdots$$

$$\rightarrow\cdots\sqrt{-\frac{2}{3\varepsilon^2}\Big[(1-\varepsilon^2)R^2-a^2-\frac{\varepsilon^2k^2}{2}\Big]}\Big\}-\frac{k}{2}. \qquad \text{(IV.44)}$$

Для определения величины p воспользуемся рис. 11. Имеем

$$p^2=(R-PN)^2-(ON+k)^2=\left(R-\sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2x^2)}\right)^2-(\varepsilon^2x+k)^2,$$

откуда

$$p=\sqrt{\left(R-\sqrt{(1-\varepsilon^2)(a^2-\varepsilon^2x^2)}\right)^2-(\varepsilon^2x+k)^2}. \qquad \text{(IV.45)}$$

Как видно из рис. 12 и 13, максимальные величины R получаются в том случае, когда x соответственно будет определен по формулам (IV.39) и (IV.41). Следовательно, при определении p, соответствующего наибольшей величине R, т. е. радиусу скважины, в выражение (IV.45) должно быть подставлено в зависимости от применимости формул x из выражений (IV.39) или (IV.41). В случае, если $k = 0$, формулы, определяющие p долота, значительно упрощаются. Так, подставив в формулы (IV.39) и (IV.40) вместо k его значение, равное нулю, получим в случае, когда величина

$$|(1-\varepsilon^2)R^2-a^2|>0,$$

$$x_1=0,$$

$$x_2=0.$$

Значение величины p при этом будет равно из формулы (IV.45):

$$p=\sqrt{(R-\sqrt{(1-\varepsilon^2)a^2})^2}=R-a\sqrt{(1-\varepsilon^2)}.$$

В случае, когда $k = 0$, а величина $|(1-\varepsilon^2)R^2-a^2|<0$, то

$$x_1=\sqrt{[3up]} \text{ и } x_2=-\sqrt{[3up]}.$$

Так как оба значения корня в формуле (IV.45) возводятся в квадрат, то в этом случае $p_1 = p_2$.

Определение величины k по заданным параметрам

Вследствие подобия треугольников O_1PD и PNQ (см. рис. 11) можно написать

$$\frac{R}{PN}=\frac{O_1D}{PQ}$$

или

$$\frac{R}{\sqrt{(1-\varepsilon^2)^2a^2+\varepsilon^2y^2}}=\frac{p+y}{y},$$

откуда

$$y^4+B_1y^3+B_2y^2+B_3y+B_4=0, \qquad \text{(IV.46)}$$

где

$$B_1=2p;$$

$$B_2=\frac{1}{\varepsilon^2}[\varepsilon^2p^2+(1-\varepsilon^2)^2a^2-R^2];$$

$$B_3=\frac{2}{\varepsilon^2}[1-\varepsilon^2]^2a^2p;$$

$$B_4=\frac{(1-\varepsilon^2)^2}{\varepsilon^2}a^2p^2.$$

Нахождение корней этого уравнения производится по такой же методике, как для уравнения (IV.4).

Обозначим для упрощения величины

$$\frac{B_1B_3}{3}-\frac{1}{9}B_2^2-\frac{4}{3}B_4=B_5, \tag{IV.47}$$

$$\frac{B_1B_2B_3}{6}+\frac{4}{3}B_2B_4-\frac{1}{2}B_1^2B_4-\frac{1}{27}B_2^3-\frac{1}{2}B_3^2=B_6, \tag{IV.48}$$

$$\Gamma_1=\sqrt[3]{-B_6+\sqrt{B_6^2+B_5^3}}, \tag{IV.49}$$

$$\Gamma_2=\sqrt[3]{-B_6-\sqrt{B_6^2+B_5^3}}. \tag{IV.50}$$

Значения y, если $[B_6^2+B_5^3]<0$, напишутся так:

$$y_1=\frac{1}{2}\left\{-\sqrt{\mp 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}-\right.$$

$$-\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}-$$

$$\left.-\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}\right\}-\frac{B_1}{4}, \tag{IV.51}$$

$$y_2=\frac{1}{2}\left\{-\sqrt{\mp 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}+\right.$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}+$$

$$\left.+\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}\right\}-\frac{B_1}{4}, \tag{IV.52}$$

$$y_3=\frac{1}{2}\left\{+\sqrt{\mp 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}+\right.$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}-$$

$$\left.-\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}\right\}-\frac{B_1}{4}, \tag{IV.53}$$

$$y_4=\frac{1}{2}\left\{+\sqrt{\mp 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}+\right.$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ-\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}-$$

$$-\sqrt[*]{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60^\circ+\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right]-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}-\frac{B_1}{4} \tag{IV.54}$$

В случае, если величина

$$[B_6^2+B_5^3]>0,$$

значения y запишутся так:

$$y_1=\frac{1}{2}\left\{-\sqrt[*]{\Gamma_1+\Gamma_2-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}+\right.$$

$$+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)^2+\frac{3}{4}(\Gamma_2-\Gamma_1)^2}+\right.}\cdots+$$

$$\left.\left.\cdots+\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)\right]}\Bigg\}-\frac{B_1}{4}, \tag{IV.55}$$

$$y_2=\frac{1}{2}\left\{-\sqrt[*]{\Gamma_1+\Gamma_2-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}-\right.$$

$$-2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)^2+\frac{3}{4}(\Gamma_2-\Gamma_1)^2}+\right.}\cdots+$$

$$\left.\left.\cdots+\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)\right]}\Bigg\}-\frac{B_1}{4}. \tag{IV.56}$$

В приведенных выражениях, где указан двойной знак $\pm$ или $\mp$, верхний знак берется, когда $B_6>0$, а нижний, когда $B_6<0$. Знаки, около которых имеются обозначения *, указаны для случая, когда величина $[\frac{1}{8}B_1^3-\frac{1}{2}B_1B_2+B_3]>0$. Если эта величина будет <0, то указанные знаки должны быть противоположными.

Для определения величины k из рис. 11 имеем

$$(k+x)^2=R^2-(y+p)^2$$

или

$$\left(k+\sqrt{a^2-\frac{y^2}{(1-\varepsilon^2)}}\right)^2=R^2-(y+p)^2,$$

откуда

$$k=\sqrt{R^2-(p+y)^2}-\sqrt{a^2-\frac{y^2}{(1-\varepsilon^2)}}. \tag{IV.57}$$

Определение зазоров между венцами шарошек

Вооружение шарошек долот, как штыревых, так и зубчатых, должно быть выполнено таким образом, чтобы в процессе работы долота зубья не соприкасались между собой и не нарушали тем самым кинематику всего долота. Опасными местами двух соседних шарошек, в которых может быть соприкосновение зубьев, являются,

во-первых, места касания окружностей венцов этих зубьев с конической поверхностью соседней шарошки и, во-вторых, места, где конусы соседних шарошек имеют наибольшее внедрение один в другой. Эти опасные места находятся в разных плоскостях сечения долота, поэтому графически они не могут быть показаны в одном плоскостном чертеже. В первом случае венец соседней шарошки приходится располагать на таком расстоянии от точки соприкосновения поверхностей конусов шарошек, чтобы обеспечивался необходимый, наперед заданный зазор. Во втором случае глубина выточки у соседней шарошки должна быть такой, чтобы заданный зазор между телом шарошки во впадине и зубьями соседней шарошки был всегда выдержан.

Расчет зазоров между венцами соседних шарошек долота

Если задан венец шарошки *I* долота и требуется определить положение венца соседней шарошки *II*, который находится на расстоянии зазора l_0 от заданного венца (рис. 11, 14, 15 и 16), то расстояние от вершины конуса шарошки *II* до искомого венца второй шарошки будет равно:

$$l_n = f_2 + l_1 + l_{x_1} + l_0,$$

где l_n — расстояние искомого венца от вершины по оси второй шарошки; f_2 — вылет второй шарошки за ось долота; l_1 — расстояние заданного венца первой шарошки от центра долота; l_0 — заданный зазор между венцами в направлении оси второй шарошки.

Любой заданный венец шарошки, если он находится в зоне самоочищения с соседней шарошкой, пересекается с двумя венцами этой шарошки на ее конической поверхности. Положение точек пересечения определяется размером l_x.

В случае, если $B_4^2 + B_4^3 < 0$,

$$l_{x_1} = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{\mp 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]} + \right.$$

$$+\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60° - \frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]} +$$

$$\left.+\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60° + \frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]}\right\} - \frac{B_1}{4},$$

$$l_{x_2} = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{\mp 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]} - \right.$$

$$-\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60° - \frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]} -$$

$$\left.-\sqrt{\pm 2\sqrt{|B_5|}\cos\left[60° + \frac{1}{3}\arccos\frac{|B_6|}{|B_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]}\right\} - \frac{B_1}{4}.$$

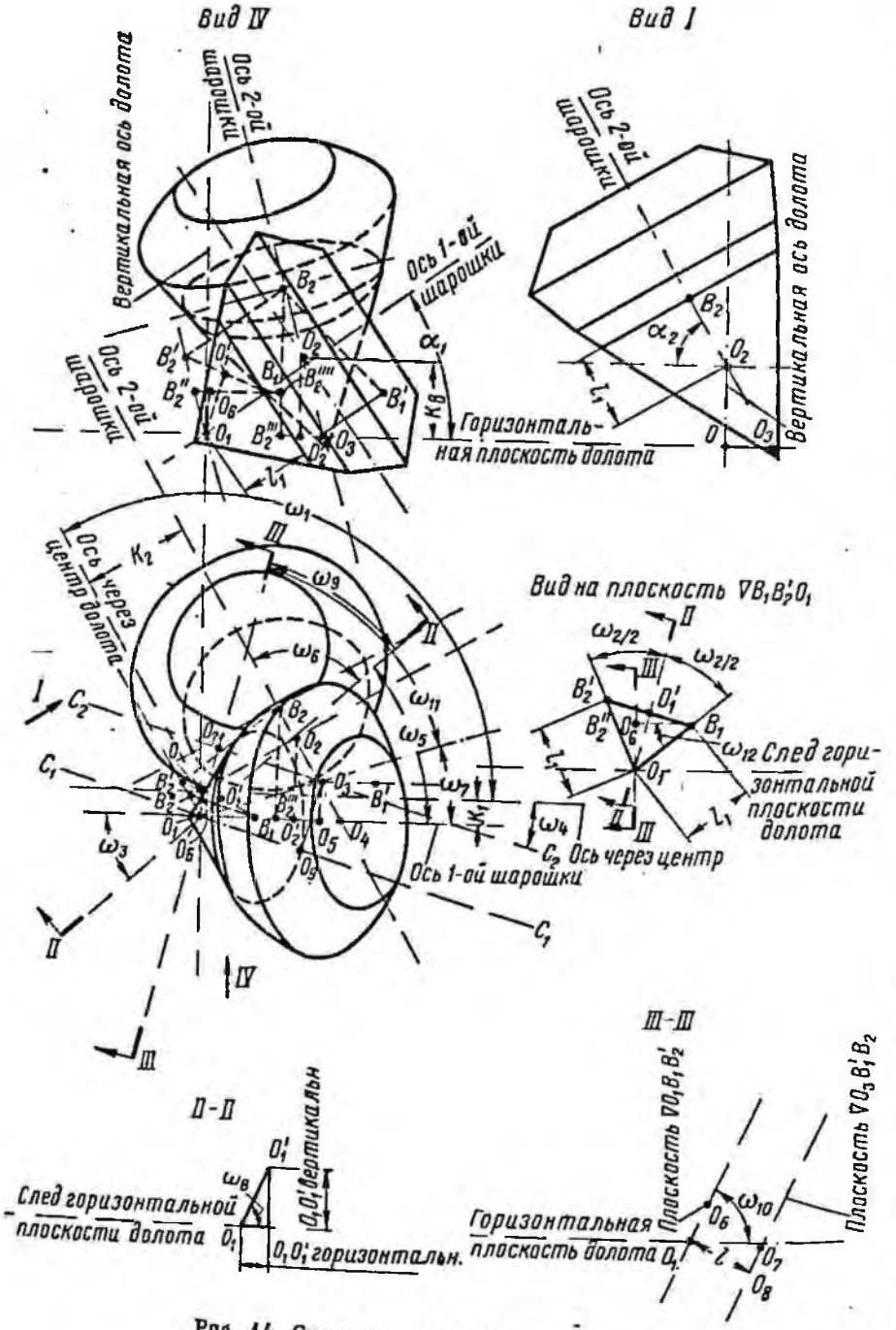
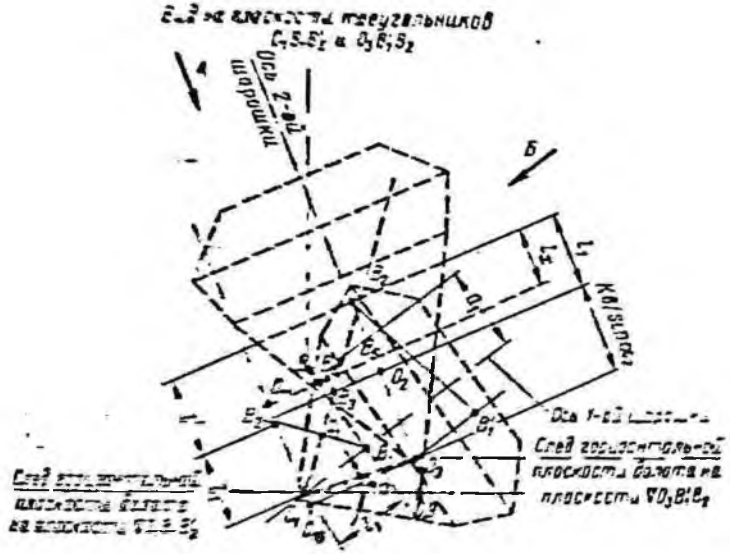


Рис. 14. Схема венцов соседних шарошек.



Совмещенные проекции А и Б

по А

по В

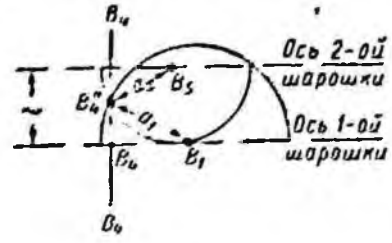


Рис. 15. Совмещенная схема венцов соседних шарошек.

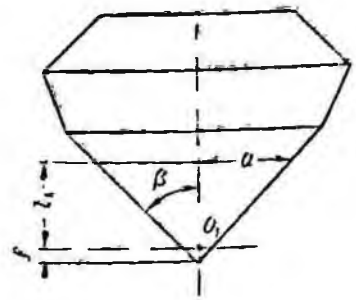


Рис. 16. Схема шарошки.

В тех членах этих выражений, где указан знак $\pm$ или $\mp$, верхний знак берется, когда $B_6 > 0$, а нижний, когда $B_6 < 0$. В случае, если $B_6^2 + B_5^3 \geqslant 0$,

$$l_{x_1} = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{\Gamma_1 + \Gamma_2 - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]} + \right.$$

$$+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2} - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]\right)^2 + \frac{3}{4}(\Gamma_2-\Gamma_1)^2} + \right.} \cdots \rightarrow$$

$$\left.\left. \rightarrow \cdots + \left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2} - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]\right)\right]}\left.\right\} - \frac{B_1}{4},$$

$$l_{x_2} = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{\Gamma_1 + \Gamma_2 - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]} - \right.$$

$$-2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2} - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]\right)^2 + \frac{3}{4}(\Gamma_2-\Gamma_1)^2} + \right.} \cdots \rightarrow$$

$$\left.\left. \rightarrow \cdots + \left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2} - \frac{2}{3}\left[B_2 - \frac{3}{8}B_1^2\right]\right)\right]}\left.\right\} - \frac{B_1}{4}.$$

Здесь

$$\Gamma_1 = \sqrt[3]{-B_6 + \sqrt{B_6^2 + B_5^3}};$$

$$\Gamma_2 = \sqrt[3]{-B_6 - \sqrt{B_6^2 + B_5^3}};$$

$$B_5 = \left[\frac{B_1 B_3}{3} - \frac{1}{9}B_2^2 - \frac{4}{3}B_4\right];$$

$$B_6 = \left[\frac{1}{6}B_1 B_2 B_3 + \frac{4}{3}B_2 B_4 - \frac{1}{2}B_1^2 B_4 - \frac{1}{27}B_2^3 - \frac{1}{2}B_3^2\right];$$

$$B_1 = -\frac{2}{C_6}[C_2 - C_4];$$

$$B_2 = \frac{1}{C_6^2}\{[C_2 - C_4]^2 - 2C_6[C_1 - C_3 - l^2] - 4l^2 C_5\};$$

$$B_3 = \frac{2}{C_6^2}\{[C_1 - C_3 - l^2][C_2 - C_4] - 2l^2 C_4\};$$

$$B_4 = \frac{1}{C_6^2}\{[C_1 - C_3 - l^2]^2 - 4l^2 C_3\};$$

$$C_1 = \left\{(l_1 + f_1)^2 \operatorname{tg}^2 \beta_1 - \left[l_1 \operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2} + \frac{l'}{\cos(\omega_2 - 90°)}\right]^2\right\};$$

$$C_2 = \left\{-2\left[l_1 \operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2} + \frac{l'}{\cos(\omega_2 - 90°)}\right]\frac{1}{\cos(\omega_2 - 90°)}\right\};$$

$$C_3 = \left\{(l_1 + f_2)^2 \operatorname{tg}^2 \beta_2 - \left[l_1 \operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2} - l' \operatorname{tg}(\omega_2 - 90°) - \right.\right.$$

$$- \frac{l \operatorname{ctg} \omega_{10} \sin (270^\circ - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13})}{\cos \omega_{13}} \Big]^2 \Big\};$$

$$C_4 = \Big\{ 2 (l_1 + f_2) \operatorname{tg}^2 \beta_2 + 2 \Big[l_1 \operatorname{tg} \frac{\omega_2}{2} - l' \operatorname{tg} (\omega_2 - 90^\circ) -$$

$$- \frac{l \operatorname{ctg} \omega_{10} \sin (270^\circ - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13})}{\cos \omega_{13}} \Big] \cdot \operatorname{tg} (\omega_2 - 90^\circ) \Big\};$$

$$C_5 = |\operatorname{tg}^2 \beta_2 - \operatorname{tg}^2 (\omega_2 - 90^\circ)|;$$

$$C_6 = \frac{1}{\cos^2 \beta_2};$$

$$\sin \frac{\omega_2}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)^2 - 2 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos \omega_1};$$

$$l' = \frac{k_b}{\sin \alpha_2} + \frac{l \operatorname{ctg} \omega_{10} \cos (270^\circ - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13})}{\cos \omega_{13}};$$

$$l = \sin \omega_{10} \cos \omega_{11} \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2 k_1 k_2 \cos \omega_1 + k_b^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_2 - \cdots \rightarrow}$$

$$\cdots \rightarrow \overline{- 2 k_b \operatorname{ctg} \alpha_2 \cos \omega_6 \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2 k_1 k_2 \cos \omega_1}};$$

$$\operatorname{tg} \omega_{10} = \frac{\lg \omega_8}{\cos \omega_9};$$

$$\cos \omega_9 = \sqrt{1 - \frac{(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)^2}{4 \cos^2 \frac{\omega_2}{2}}};$$

$$\omega_9 = 90^\circ - \omega_3 - \omega_4;$$

$$\cos \omega_3 =$$

$$= \frac{\cos^2 \frac{\omega_2}{2} - \frac{(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)^2}{4} + \cos^2 \alpha_1 - \frac{\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 - 2 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos \omega_1}{4}}{2 \cos \alpha_1 \sqrt{\cos^2 \frac{\omega_2}{2} - \frac{(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)^2}{4}}};$$

$$\sin \omega_4 = \frac{\sin \omega_1 \cos \alpha_2 \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}}{\sqrt{\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 \frac{\sin^2 \alpha_1}{\sin^2 \alpha_2} - 2 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \cos \omega_1}};$$

$$\cos \omega_{12} = \cos \alpha_1 \cos \omega_4;$$

$$\operatorname{tg} \omega_{13} = \frac{\cos (\omega_7 + \omega_4)}{\cos \omega_{10} \cos \omega_{11}}$$

$$\cos \omega_7 =$$

$$= \frac{k_2 \sin \omega_1 - k_b \operatorname{ctg} \alpha_2 \cos \omega_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2 k_1 k_2 \cos \omega_1 + k_b^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_2 - 2 k_b \operatorname{ctg} \alpha_2 \cos \omega_6} \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2 k_1 k_2 \cos \omega_1}};$$

$$\omega_{11} = 90^\circ - (\omega_7 + \omega_4);$$

$$\omega_8 = \omega_1 - \omega_5;$$

$$\sin \omega_5 = \frac{k_1 - k_2 \cos \omega_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1 k_2 \cos \omega_1}};$$

Обозначения исходных параметров даны (см. рис. 11, 14, 15, 16).

Пример. Определить зазор между венцом шарошки *II*, у которого $l_n = 11$ *мм*, от точки пересечения с венцом шарошки *I* с $l_1 = 14$ *мм*.

Долото трехшарошечное со следующими параметрами: $\alpha_1 = \alpha_2 = 35°$, $f_1 = f_2 = 3$ *мм*; $k_1 = k_2 = 4$ *мм*, $k_c = 0$, $\beta_1 = \beta_2 = 45°$, $\omega_1 = 120°$.

По этим заданным параметрам ведем расчет:

$$\sin \frac{\omega_2}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\cos^2 35° + \cos^2 35° + 0 - 2 \cos^2 35° \cos 120°} = 0{,}70941,$$

$$\frac{\omega_2}{2} = 45° 11' 14'',$$

$$\cos \omega_3 = \sqrt{1 \frac{4 \sin^2 35°}{4 \cos^2 45° 11' 14''}} = 0{,}58112,$$

$$\omega_3 = 54° 28' 15'',$$

$$\cos \omega_9 = \frac{\cos^2 45° 11' 14'' - \sin^2 35° + \cos^2 35° - \frac{2 \cos^2 35° (1 - \cos 120°)}{4}}{2 \cos 35° \sqrt{\cos^2 45° 11' 14'' - \sin^2 35°}} = 0{,}50000,$$

$$\omega_9 = 60°,$$

$$\sin \omega_4 = \frac{\sin 120° \cos 35° \cdot 1}{\sqrt{\cos^2 35° + \cos^2 35° \cdot 1 - 2 \cos^2 \cdot 35° \cdot 1 \cos 120°}} = 0{,}50000,$$

$$\omega_4 = 30°,$$

$$\omega_6 = 90° - 60° - 30° = 0°,$$

$$\operatorname{tg} \omega_{10} = \frac{\operatorname{tg} 54° 28' 15''}{\cos 0°} = \operatorname{tg} 54° 28' 15'',$$

$$\omega_{10} = 54° 28' 15'',$$

$$\cos \omega_{12} = \cos 35° \cos 30° = 0{,}70951,$$

$$\omega_{12} = 44° 48' 46''$$

$$\sin \omega_5 = \frac{4 - 4 \cos 120°}{\sqrt{2 \cdot 4^2 - 2 \cdot 4^2 \cos 120°}} = 0{,}86603,$$

$$\omega_5 = 60°,$$

$$\omega_8 = 120° - 60° = 60°,$$

$$\cos \omega_7 = \frac{4 \sin 120° - 0 \operatorname{ctg} 35° \cos 120°}{\sqrt{2 \cdot 4^2 - 2 \cdot 4^2 \cos 120° + 0 - 0}} = 0{,}50000,$$

$$\omega_7 = 60°,$$

$$\omega_{11} = 90° - (60° + 30°) = 0°,$$

$$\operatorname{tg} \omega_{13} = \frac{\cos (60° + 30°)}{\cos 54° 28' 15'' \cos 0°} = 0,$$

$$\omega_{13} = 0°,$$

$$l = \sin 54° 28' 15'' \cos 0 \sqrt{2 \cdot 4^2 - 2 \cdot 4^2 \cos 120°} + 0 = 5{,}6383,$$

$$l' = 0 + \frac{5{,}6383 \operatorname{ctg} 54° 28' 15'' \cdot \cos (270° - 90° 22' 28'' - 44° 48' 46'' - 0)}{\cos 0°} =$$

$$= 2{,}8376,$$

$$C_1 = \left\{ (14+3)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 45° - \left[14 \operatorname{tg} 45° 11' 14'' + \frac{2{,}8376}{\cos (90° 22' 28'' - 90°)} \right]^2 \right\} =$$

$$= 2{,}4225,$$

$$C_2 = \left\{ -2 \left[14 \operatorname{tg} 45° 11' 14'' + \frac{2{,}8376}{\cos (90° 22' 28'' - 90°)} \right] \times \right.$$

$$\left. \times \frac{1}{\cos (90° 22' 28'' - 90°)} \right\} = -33{,}8579,$$

$$C_3 = \left\{ 17^2 \operatorname{tg}^2 45° - \left[14 \operatorname{tg} 45° 11' 14'' - 2{,}8376 \operatorname{tg} 22' 28'' - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{5{,}6383 \operatorname{ctg} 54° 28' 15'' \sin 134° 58' 46''}{\cos 0°} \right]^2 \right\} = 163{,}0083,$$

$$C_4 = \left\{ 2 \cdot 17 \operatorname{tg}^2 45° + 2 \left[14 \operatorname{tg} 45° 11' 14'' - 2{,}8376 \operatorname{tg} 0° 22' 28'' - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{5{,}6383 \operatorname{ctg} 54° 28' 15'' \sin 134° 58' 46''}{\cos 0°} \right] \operatorname{tg} 0° 22' 27'' \right\} = 34{,}1468,$$

$$C_5 = \{ \operatorname{tg}^2 45° - \operatorname{tg}^2 0° 22' 28'' \} = 0{,}99996,$$

$$C_6 = \frac{1}{\cos^2 45°} = 2{,}0000,$$

$$B_1 = -\frac{2}{2} [-33{,}8579 - 34{,}1468] = 68{,}0047,$$

$$B_2 = \frac{1}{2^2} \{ (-68{,}0047)^2 - 2 \cdot 2 \{ 2{,}4225 - 163{,}0083 - 5{,}6383^2 \} -$$

$$- 4 \cdot 5{,}6383^2 \cdot 0{,}99996 \} = 1316{,}7468,$$

$$B_3 = \frac{2}{2^2} \{ [2{,}4225 - 163{,}0083 - 5{,}6383^2] [-33{,}8579 - 34{,}1468] -$$

$$- 2 \cdot 5{,}6383^2 \cdot 34{,}1468 \} = 5455{,}7016,$$

$$B_4 = \frac{1}{2^2} \{ [2{,}4225 - 163{,}0083 - 5{,}6383^2]^2 - 4 \cdot 5{,}6383^2 \cdot 163{,}0083 \} =$$

$$= 4070{,}0352,$$

$$B_5 = \frac{68{,}0047 \cdot 5455{,}7016}{3} - \frac{1316{,}7468^2}{9} - \frac{4 \cdot 4070{,}0352}{3} = -7{,}440268 \cdot 10^4,$$

$$E_6 = \frac{68{,}0047 \cdot 1316{,}7468 \cdot 5455{,}7016}{6} + \frac{4 \cdot 1316{,}7468 \cdot 4070{,}0352}{3} -$$

$$- \frac{68{,}0047^2 \cdot 4070{,}0352}{2} - \frac{1316{,}7468^3}{27} - \frac{5455{,}7016^2}{2} = -20{,}281833 \cdot 10^6,$$

$$E_6^2 + E_5^3 = -0{,}523011 \cdot 10^{12} < 0,$$

$$l_{x_1} = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{+2\sqrt{|7{,}440268 \cdot 10^4|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|20{,}281839 \cdot 10^6|}{|7{,}440268 \cdot 10^4|^{3/2}}\right] - \right.}$$

$$- \frac{2}{3}\left[1316{,}7468 - \frac{3}{8}68{,}0047^2\right] +$$

$$+ \sqrt{-2\sqrt{|7{,}440268 \cdot 10^4|}\cos\left[60° - \frac{1}{3}\arccos\frac{|20{,}281833 \cdot 10^6|}{|7{,}440268 \cdot 10^4|^{3/2}}\right] -}$$

$$- \frac{2}{3}\left[1316{,}7468 - \frac{3}{8}68{,}0047^2\right] +$$

$$+ \sqrt{-2\sqrt{|7{,}440268 \cdot 10^4|}\cos\left[60° + \frac{1}{3}\arccos\frac{|20{,}281833 \cdot 10^6|}{|7{,}440268 \cdot 10^4|^{3/2}}\right] -}$$

$$\left. - \frac{2}{3}\left[1316{,}7468 - \frac{3}{8}68{,}0047^2\right]\right\} - \frac{68{,}0047}{4} = -0{,}97863,$$

$$l_{x_2} = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{+2\sqrt{|7{,}440268 \cdot 10^4|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|20{,}281833 \cdot 10^6|}{|7{,}440268 \cdot 10^4|^{3/2}}\right] - \right.}$$

$$- \frac{2}{3}\left[1316{,}7468 - \frac{3}{8}68{,}0047^2\right] -$$

$$- \sqrt{-2\sqrt{|7{,}440268 \cdot 10^4|}\cos\left[60° - \frac{1}{3}\arccos\frac{|20{,}281833 \cdot 10^6|}{|7{,}440268 \cdot 10^4|^{3/2}}\right] -}$$

$$- \frac{2}{3}\left[1316{,}7468 - \frac{3}{8}68{,}0047^2\right] -$$

$$- \sqrt{-2\sqrt{|7{,}440268 \cdot 10^4|}\cos\left[60° + \frac{1}{3}\arccos\frac{|20{,}281833 \cdot 10^6|}{|7{,}440268 \cdot 10^4|^{3/2}}\right] -}$$

$$\left. - \frac{2}{3}\left[1316{,}7468 - \frac{3}{8}68{,}0047^2\right]\right\} - \frac{68{,}0047}{4} = -4{,}32079.$$

Если расстояние l_n шарошки *II* задано ($l_n = 11{,}0$), то зазор l_0 составит:

$$l_0 = 17{,}0 - 4{,}32079 - 11{,}0 = 1{,}67921 \text{ мм}.$$

Расчет зазоров между венцом и впадиной соседней шарошки

Глубина выточки канавки m_1, межвенцового пространства шарошки на расстоянии F_1e_1'''' от вершины конуса этой шарошки вдоль образующей при заданном зазоре, равном t_1, должна составлять (рис. 11, 17 и 18):

$$m_1 = t_1 + \sin(\omega_{15} + \beta_1)\left[\frac{(l_1 + f_1)\sin\beta_1}{\sin(\omega_{15} + \beta_1)} + \frac{(l_1 + f_2)\sin\beta_2}{\sin(\omega_{14} + \beta_2)} - \right.$$

$$- \sqrt{\left[\left(l_1 + \frac{k_5}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1 + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +}$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$
$$+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l\sin\alpha_1\right]^2\Bigg].$$

Расстояние $F_1\varepsilon_1''''$ при этом равно:

$$F_1\varepsilon_1''''=\frac{(l_1+f_1)\sin\omega_{15}}{\sin(\omega_{15}+\beta_1)}+\cos(\omega_{15}+\beta_1)\left[\frac{(l_1+f_1)\sin\beta_1}{\sin(\omega_{15}+\beta_1)}+\frac{(l_1+f_2)\sin\beta_2}{\sin(\omega_{14}+\beta_2)}-\right.$$
$$-\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+}$$
$$\sqrt{\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+}$$
$$\left.+\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l_1\sin\alpha_1\right]^2}\right].$$

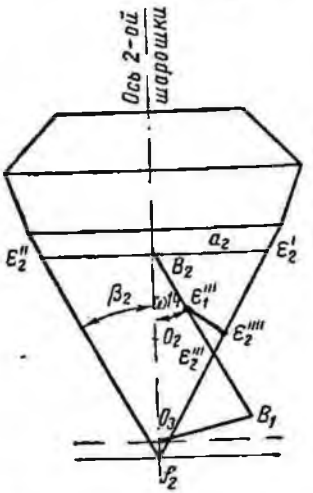


Рис. 17. Положение центров венцов шарошек.

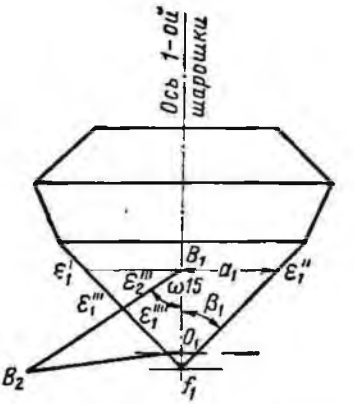


Рис. 18. Положение центров венцов шарошек.

Здесь

$$\cos\omega_{14}=\frac{\Pi_1}{\Pi_2},$$

где

$$\Pi_1=\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)^2+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$
$$+\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$
$$+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l_1\sin\alpha_1\right]^2-\frac{l^2}{\sin^2\omega_{10}\cos^2\omega_{11}}-$$
$$-l_1^2+\frac{2l_1l\cos\alpha_1\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}};$$

$$Л_2 =$$

$$= 2\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sqrt{\left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2 \sin\omega_1 + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +}$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1 - \left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+\left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2;$$

$$\cos\omega_{15} = \frac{Л_3}{Л_4},$$

где

$$Л_3 = l_1^2 + \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1 + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1 - \left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+\left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2 - \left[\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}} +\right.$$

$$\left.+\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1\right]^2 - \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 +\right.$$

$$\left.+\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 - \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2\right]^2;$$

$$Л_4 = 2l_1\sqrt{\left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1 + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +}$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1 - \left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+\left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2.$$

Таким образом определяется требуемая глубина выточки у соседней шарошки около линии B_1B_2, соединяющей точки B_1 и B_2, имеющие одинаковые расстояния l_1. Задаваясь разными значениями l_n, можно определить величины m_n в различных местах шарошек.

Если m_n задана заранее, то из приведенных формул нетрудно определить соответствующие зазоры t_n.

Для примера определим зазор t_1 между венцом и стенкой шарошки, для которого был подсчитан зазор l_0 в предыдущем случае. Примем

$$l_1 = 14 \text{ мм}; \quad m_1 = 6 \text{ мм}.$$

$$Л_1 = 14^2 + \left[14\cos 35^\circ \sin 120^\circ + \frac{5.6383 \cdot \sin 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 +$$

$$+\left[14\cos 35^\circ - 14\cos 35^\circ \cdot \cos 120^\circ - \frac{5.6383\cos 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 +$$

$$+[14\sin 35^\circ - 14\sin 35^\circ]^2 - \frac{5.6383^2}{\sin^2 54^\circ 28' 15'' \cos^2 0} - 14^2 +$$

$$+\frac{2 \cdot 14 \cdot 5.6383\cos 35^\circ \cos 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ} = 474{,}006366,$$

$$Л_2 = 2 \cdot 14 \sqrt{\left[14\cos 35^\circ \sin 120^\circ + \frac{5.6383 \sin 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 +}$$

$$+ \left[14\cos 35^\circ - 14\cos 35^\circ \cos 120^\circ - \frac{5.6383 \cos 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 +$$

$$+ [14\sin 35^\circ - 14\sin 35^\circ]^2} = 589{,}0304,$$

$$\cos \omega_{14} = \frac{474.006366}{589.0304} = 0{,}80472,$$

$$\omega_{14} = 36^\circ 25' 00'',$$

$$Л_3 = 14^2 + \left[14\cos 35^\circ \sin 120^\circ + \frac{5.6383 \sin 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 +$$

$$+ \left[14\cos 35^\circ - 14\cos 35^\circ \cos 120^\circ - \frac{5.6383 \cos 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 +$$

$$+ [14\sin 35^\circ - 14\sin 35^\circ]^2 - \left[\frac{5.6383 \sin 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ} +\right.$$

$$\left. + 14\cos 35^\circ \sin 120^\circ\right]^2 - \left[14\cos 35^\circ \cos 120^\circ + \frac{5.6383 \cos 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 -$$

$$- [14\sin 35^\circ]^2 = 325{,}4$$

$$Л_4 = 2 \cdot 14 \sqrt{\left[14\cos 35^\circ \sin 120^\circ + \frac{5.6383 \sin 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0}\right]^2 +}$$

$$+ \left[14\cos 35^\circ - 14\cos 35^\circ \cos 120^\circ - \frac{5.6383 \cos 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 +$$

$$+ [14\sin 35^\circ - 14\sin 35^\circ]^2} = 589{,}0304,$$

$$\cos \omega_{15} = \frac{325.4}{589.0304} = 0{,}55246,$$

$$\omega_{15} = 56^\circ 27' 50'',$$

$$t_1 = 6 - \sin(56^\circ 27' 50'' + 45^\circ 00' 00'') \left[\frac{(14+3)\sin 45^\circ}{\sin(56^\circ 27' 50'' + 45^\circ)} +\right.$$

$$\left. + \frac{(14+3)\sin 45^\circ}{\sin(36^\circ 25' 00'' + 45^\circ)}\right] - \sqrt{\left[14\cos 35^\circ \sin 120^\circ +\right.}$$

$$\left. + \frac{5.6383 \sin 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2 + \left[14\cos 35^\circ - 14\cos 35^\circ \cos 120^\circ -\right.$$

$$\left. - \frac{5.6383 \cos 60^\circ}{\sin 54^\circ 28' 15'' \cos 0^\circ}\right]^2} + 0 = 6 - 0{,}98005 \cdot 3{,}3856 = 2{,}6819 \text{ мм},$$

$$F_1 \varepsilon_1'''' =$$

$$= \frac{(14+3)\sin 56^\circ 27' 50''}{\sin(56^\circ 27' 50'' + 45^\circ)} + \cos(56^\circ 27' 50'' + 45^\circ)\, 3{,}3856 = 13{,}7857 \text{ мм}.$$

Расчет зазоров между венцами соседних шарошек

(выводы зависимостей)

В общем случае шарошки могут быть в одном долоте с различными углами наклона, конусами и с различными вертикальными смещениями шарошек. Общий случай расположения соседних шарошек долота см. на рис. 14.

Введем дополнительные обозначения: $k_в$ — вертикальное смещение первой шарошки относительно второй; f_1 — вылет первой шарошки за ось долота; f_2 — вылет второй шарошки за ось долота; β_1 — угол конуса первой шарошки; β_2 — угол конуса второй шарошки; a — радиус венца шарошки; ω_1 — угол между осями соседних шарошек в горизонтальной плоскости долота.

Задачей расчета является определение точек пересечения заданного венца первой шарошки с венцом второй шарошки. Определим требуемые для расчета дополнительные углы и отрезки сечений шарошек. Плоскость, перпендикулярную к оси долота и проходящую через точку O, назовем горизонтальной плоскостью долота. Расположим точку O так, чтобы точка O_1 — ближайшая точка оси первой шарошки к оси долота — находилась в горизонтальной плоскости долота. Таким образом, линия OO_1 будет расположена в горизонтальной плоскости долота. Ось второй шарошки пересечет горизонтальную плоскость в точке O_3. Через точку O_1 проведем линию, параллельную оси второй шарошки, и от точки O_1 отложим отрезок $O_1B'_2$, равный отрезку O_2B_2. Точку B_2 на оси второй шарошки выберем так, чтобы $O_2B_2 = O_1B_1 = l_1$, тогда по условию $O_1B_1 = O_1B'_2 = l_1$.

Из пространственного треугольника $B_1O_1B'_2$ определим расстояние между точками B_1 и B'_2.

Из рис. 14 видно, что горизонтальные проекции отрезков

$$O_1B_{1гор} = O_1B_1\cos\alpha_1 = l_1\cos\alpha_1,$$

$$O_1B'_{2гор} = O_1B'_2\cos\alpha_2 = O_1B_1\cos\alpha_2 = l_1\cos\alpha_2,$$

$$B_1B'_{гор} = \sqrt{l_1^2(\cos^2\alpha_1+\cos^2\alpha_2) - 2l_1^2\cos\alpha_1\cos\alpha_2\cos\omega_1},$$

а также, что вертикальная проекция отрезков будет равна соответственно

$$O_1B_{1верт} = l_1\sin\alpha_1,$$

$$O_1B'_{2верт} = l_1\sin\alpha_2.$$

Следовательно,

$$B_1B'_{2верт} = l_1(\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1).$$

Весь отрезок $B_1B'_2$ будет равен:

$$B_1B'_2 = \sqrt{(B_1B'_{2гор})^2 + (B_1B'_{2верт})^2} =$$

$$= \sqrt{l_1^2[\cos^2\alpha_1 + \cos^2\alpha_2 + (\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1)^2 - 2\cos\alpha_1\cos\alpha_2\cos\omega_1]}.$$

В этом же пространственном треугольнике $B_1O_1B_2'$ определим угол ω_2 (см. рис. 14). Так как этот треугольник равнобедренный, то

$$\sin\frac{\omega_2}{2}=\frac{B_1B_2'}{\frac{2}{l_1}}=\frac{O_1'B_1}{l_1}=$$

$$=\frac{1}{2}\sqrt{\cos^2\alpha_1+\cos^2\alpha_2+(\sin\alpha_1-\sin\alpha_2)^2-2\cos\alpha_1\cos\alpha_2\cos\omega_1}. \quad (IV.74)$$

Так как точка O_1' лежит посредине отрезка B_1B_2', то вертикальная проекция отрезка O_1O_1' будет составлять

$$O_1O_{1\text{верт}}'=\frac{l_1(\sin\alpha_1+\sin\alpha_2)}{2}.$$

Весь отрезок O_1O_1' будет равен:

$$O_1O_{1\text{верт}}'=l_1\cos\frac{\omega_2}{2}.$$

Следовательно, горизонтальная проекция отрезка O_1O_1' будет равна:

$$O_1O_{1\text{гор}}'=\sqrt{l_1^2\left\{\cos^2\frac{\omega_2}{2}-\frac{(\sin\alpha_1+\sin\alpha_2)^2}{4}\right\}}=$$

$$=l_1\sqrt{\cos^2\frac{\omega_2}{2}-\frac{(\sin\alpha_1+\sin\alpha_2)^2}{4}}.$$

Определяем угол ω_3 (см. рис. 14). Благодаря тому, что горизонтальные проекции линий O_1B_1 и O_1B_2' не равны между собой, проекция равнобедренного треугольника $O_1B_1B_2'$ на горизонтальную плоскость долота не является равнобедренным треугольником. Однако проекции отрезков B_1O_1' и O_1B_2' будут равны между собой. Так как

$$B_1O_{1\text{гор}}'=\frac{l_1}{2}\sqrt{\cos^2\alpha_1-\cos^2\alpha_2-2\cos\alpha_1\cos\alpha_2\cos\omega_1},$$

а также

$$B_1O_{1\text{гор}}'=\sqrt{O_1O_{1\text{гор}}'^2+O_1B_{1\text{гор}}^2-2O_1O_{1\text{гор}}'O_1B_{1\text{гор}}^2\cos\omega_3},$$

то

$$\cos\omega_3=\frac{\cos^2\frac{\omega_2}{2}-\frac{(\sin\alpha_1+\sin\alpha_2)^2}{4}+\cos^2\omega_1-\frac{\cos^2\alpha_1+\cos^2\alpha_2-2\cos\alpha_1\cos\alpha_2\cos\omega_1}{4}}{2\cos\alpha_1\sqrt{\cos^2\frac{\omega_2}{2}-\frac{(\sin\alpha_1+\sin\alpha_2)^2}{4}}}. \quad (IV.75)$$

Из точки B_1, лежащей на оси первой шарошки, проведем плоскость, параллельную горизонтальной плоскости долота. Она

пересечет линию O_1B_2' в точке B_2''. Треугольники, образованные отрезками $O_1B_{2\text{гор}}'$, $O_1B_{2\text{верт}}'$, O_1B_2' и O_1B_2'', $O_1B_{2\text{гор}}''$, $O_1B_{2\text{верт}}''$, будут подобны. Кроме того, ясно, что

$$O_1B_{2\text{верт}}'' = O_1B_{1\text{верт}} = l_1 \sin\alpha_1,$$

а

$$O_1B_{2\text{верт}}' = l_1 \sin\alpha_2,$$

откуда

$$O_1B_{2\text{гор}}'' = l_1 \cos\alpha_2 \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}.$$

Полная длина отрезка B_1B_2'', лежащего в горизонтальной плоскости, будет равна:

$$B_1B_2'' = l_1 \sqrt{\cos^2\alpha_1 + \cos^2\alpha_2 \frac{\sin^2\alpha_1}{\sin^2\alpha_2} - 2\cos\alpha_1\cos\alpha_2 \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}\cos\omega_1}.$$

Применяя теорему синусов к треугольнику $O_1B_1B_2''$, можно написать

$$\frac{\sin\omega_4}{O_1B_{2\text{гор}}''} = \frac{\sin\omega_1}{B_1B_2''},$$

откуда

$$\sin\omega_4 = \frac{\sin\omega_1\cos\alpha_2\dfrac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}}{\sqrt{\cos^2\alpha_1 + \cos^2\alpha_2\dfrac{\sin^2\alpha_1}{\sin^2\alpha_2} - 2\cos\alpha_1\cos\alpha_2\dfrac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}\cos\omega_1}}. \quad \text{(IV.76)}$$

Перейдем к определению угла ω_5 (см. рис. 14). Для этого определим горизонтальную составляющую отрезка O_1O_2

$$O_1O_{2\text{гор}} = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1}$$

и горизонтальную составляющую отрезка O_2O_2'

$$O_2O_{2\text{гор}}' = k_1 + k_2\sin(\omega_1 - 90°).$$

Тогда угол ω_5 находим из соотношения

$$\sin\omega_5 = \frac{O_2O_{2\text{гор}}'}{O_1O_{2\text{гор}}} = \frac{k_1 + k_2\sin(\omega_1 - 90°)}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1}}. \quad \text{(IV.77)}$$

Обозначив точку пересечения горизонтальных проекций осей первой и второй шарошек через O_4, замечаем, что угол $O_1O_4O_2$ в горизонтальной плоскости составит

$$\angle O_1O_4O_{2\text{гор}} = 180° - \omega_1.$$

Угол ω_6 из треугольника $O_1O_2O_4$ (в горизонтальной плоскости) определим так:

$$\omega_6 = 180° - \omega_5 - (180° - \omega_1) = \omega_1 - \omega_5. \quad \text{(IV.78)}$$

Горизонтальная проекция отрезка O_2O_3 определяется:

$$O_2O_{3\text{гор}} = k_3 \operatorname{ctg}\alpha_2,$$

откуда

$$O_1O_3 = \sqrt{O_1O_{2\text{гор}}^2 - O_2O_{3\text{гор}}^2 - 2(O_1O_{2\text{гор}})(O_2O_{3\text{гор}})\cos\omega_6} =$$

$$= \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1 + k_3^2\operatorname{ctg}^2\alpha_2 - 2k_3\operatorname{ctg}\alpha_2\cos\omega_6 \times} \cdots \rightarrow$$

$$\rightarrow \cdots \overline{\times \sqrt{k_1^2 - k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1}}.$$

Обозначая проекцию точки O_3 на горизонтальную проекцию оси первой шарошки через O_5 (см рис. 14), определим отрезок O_1O_5:

$$O_1O_5 = k_2\cos(\omega_1 - 90°) + k_3\operatorname{ctg}\alpha_2\sin(\omega_1 - 90°),$$

откуда

$$\cos\omega_7 = \frac{O_1O_5}{O_1O_3} =$$

$$= \frac{k_2\cos(\omega_1 - 90°) + k_3\operatorname{ctg}\alpha_2\sin(\omega_1 - 90°)}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1 + k_3^2\operatorname{ctg}^2\alpha_2 - 2k_3\operatorname{ctg}\alpha_2\cos\omega_6 \times}} : \rightarrow$$

$$\rightarrow : : \overline{\times \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1}}, \qquad \text{(IV.79)}$$

а также расстояние O_3O_5 равно:

$$O_3O_5 = \sin\omega_7\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1 + k_3^2\operatorname{ctg}^2\alpha_2 -} \cdots \rightarrow$$

$$\rightarrow \cdots \overline{-2k_3\operatorname{ctg}\alpha_2\cos\omega_6}\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1} = O_3O_5. \qquad \text{(IV.80)}$$

На рис. 14 показана точка O_6. Она лежит в точке пересечения плоскости, проходящей через точку O_1 и перпендикулярной к плоскости треугольника $O_1B_1B_2'$ и к горизонтальной плоскости долота, с линией B_1B_2''. Так как указанная плоскость перпендикулярна ко всем горизонтальным плоскостям (см. рис. 14), то угол $O_1O_6B_1$ будет прямым как в горизонтальной проекции (см. рис. 14), так и в виде на плоскость треугольника $O_1B_1B_2$. Следовательно, из прямоугольного треугольника $O_1O_6B_1$ можно определить горизонтальную проекцию отрезка O_1O_6:

$$O_1O_{6\text{гор}} = O_1B_{1\text{гор}}\sin\omega_4 = l_1\cos\alpha_1\sin\omega_4,$$

$$B_1O_6 = O_1B_{1\text{гор}}\cos\omega_4 = l_1\cos\alpha_1\cos\omega_4.$$

Рассмотрим сечение II—II (см. рис. 14), образованное вертикальной плоскостью, проходящей через линию O_1O_1'. Определим угол ω_8, образуемый линией O_1O_1' с горизонтальной плоскостью долота:

$$\cos\omega_8 = \frac{O_1O_{1\text{гор}}'}{O_1O_1'} = \frac{\sqrt{\cos^2\frac{\omega_2}{2} - \frac{(\sin\alpha_1 - \sin\alpha_2)^2}{4}}}{\cos\frac{\omega_2}{2}} =$$

$$= \sqrt{1 - \frac{(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2)^2}{4\cos^2\frac{\omega_2}{2}}}. \qquad \text{(IV.81)}$$

Для нахождения угла наклона плоскости треугольника $O_1B_1B_2'$ к горизонтальной плоскости долота рассмотрим сечение по вертикальной плоскости, перпендикулярной к плоскости треугольника $O_1B_1B_2'$. Такое сечение пройдет по линии O_1O_6, так как линия эта лежит в плоскости, перпендикулярной к горизонтальной плоскости. Так как линия пересечения плоскости треугольника $O_1B_1B_2'$ с горизонтальной плоскостью долота $C_1 - C_1$ на рис. 14 будет параллельна линии B_1B_2'' (как линии пересечения плоскостью двух параллельных плоскостей) и перпендикулярна к линии O_1O_6, то угол наклона ее в плане к горизонтальной проекции оси первой шарошки будет равен ω_4.

Угол между вертикальными плоскостями, проходящими через линии O_1O_1' и O_1O_6, будет равен

$$\omega_9 = 90^\circ - \omega_3 - \omega_4. \qquad \text{(IV.82)}$$

Для дальнейших рассуждений спроектируем линию O_1O_1' на вертикальную плоскость, проходящую через линию O_1O_6. Вертикальная проекция линии O_1O_1' на указанную плоскость будет равна

$$O_1O_{1\text{пр. верт}}' = O_1O_{1\text{верт}}'.$$

Горизонтальная составляющая проекции линии O_1O_1 равна

$$O_1O_{1\text{пр. гор}}' = O_1O_{1\text{гор}}' \cos\omega_9.$$

Из точки пересечения оси второй шарошки с горизонтальной плоскостью долота O_3 проведем линию, параллельную оси первой шарошки. На эту линию спроектируем точку B_1 и обозначим эту проекцию B_1'. Плоскости треугольников $O_1B_1B_2'$ и $O_3B_1'B_2$ будут параллельны, так как две линии O_1B_1 и O_1B_2', лежащие в первой плоскости, параллельны соответственно линиям O_3B_1' и O_3B_2, лежащим во второй плоскости. Обозначив через ω_{10} угол наклона плоскостей обоих треугольников к горизонтальной плоскости долота, имеем

$$\operatorname{tg}\omega_{10} = \frac{O_1O_{1\text{пр. верт}}'}{O_1O_{1\text{пр. гор}}} = \frac{O_1O_{1\text{верт}}''}{O_1O_{1\text{гор}}\cos\omega_9} = \frac{\operatorname{tg}\omega_8}{\cos\omega_9}.$$

Линия пересечения плоскости треугольника $O_3B_1'B_2$ с горизонтальной плоскостью долота будет параллельна линии $C_1 - C_1$ и пройдет через точку O_3. Обозначим ее $C_2 - C_2$. Точку пересечения ее с вертикальной плоскостью, проходящей по линии O_1O_6, обозначим O_7. Для определения расстояния между плоскостями треугольников $O_1B_1B_2'$ и $O_3B_1'B_2$ определим сначала горизонтальную составляющую этого расстояния, т. е. O_1O_7:

$$O_1O_7 = O_1O_3\cos\omega_{11}$$

где

$$\omega_{11} = [90^\circ - (\omega_7 + \omega_4)]; \qquad \text{(IV.83)}$$

$$O_1O_7 = \cos\omega_{11}\sqrt{h_1^2 + h_2^2 - 2h_1h_2\cos\omega_1 + k_2^2\operatorname{ctg}^2\alpha_2} - \\ - 2k_2\operatorname{ctg}\alpha_2\cos\omega_6\sqrt{h_1^2 + h_2^2 - 2h_1h_2\cos\omega_1}.$$

Обозначив расстояние между плоскостями треугольников $O_1B_1B_2'$ и $O_3B_1'B_2$ через l, имеем

$$l = O_1O_7 \sin\omega_{10} = \sin\omega_{10}\cos\omega_{11} \times$$

$$\times \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1 + k_2^2\operatorname{ctg}^2\alpha_2 - 2k_2\operatorname{ctg}\alpha_2\cos\omega_6} \times$$

$$\times \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos\omega_1}. \qquad \text{(IV.84)}$$

Для дальнейших рассуждений даем вид на плоскость треугольника $O_1B_1B_2'$ и пунктиром обозначим на ней проекции с параллельной ей плоскости треугольника $O_3B_1'B_2$ (рис. 15). Так как плоскости венцов 1-й и 2-ой шарошек, пересечение которых мы ищем, будут перпендикулярны к соответствующим осям шарошек, и они изобразятся на рис. 15 в виде линий. Определяем величину отрезка O_2O_3 из рис. 14:

$$O_2O_3 = \frac{k_2}{\sin\alpha_2}.$$

Определим также величину угла ω_{12} (см. рис. 14). Так как линия O_1O_6 перпендикулярна к следу горизонтальной плоскости на плоскости треугольника $O_1B_1B_2$, то

$$O_6B_1 = O_1B_{1\text{гор}}\cos\omega_4 = l_1\cos\alpha_1\cos\omega_4,$$

$$O_6B_1 = l_1\cos\omega_{12},$$

откуда

$$\cos\omega_{12} = \cos\alpha_1\cos\omega_4. \qquad \text{(IV.85)}$$

Из рис. 14 и 15 определяем расстояние O_3O_9:

$$O_3O_9 = O_7O_8 = l\operatorname{ctg}\omega_{10}.$$

Определим величину угла ω_{13}:

$$\operatorname{tg}\omega_{13} = \frac{O_1O_9}{O_3O_9} = \frac{O_1O_3\cos(\omega_7+\omega_4)}{l\operatorname{ctg}\omega_{10}} = \frac{O_1O_3\cos(\omega_7+\omega_4)}{O_1O_7\sin\omega_{10}\operatorname{ctg}\omega_{10}} =$$

$$= \frac{O_1O_3\cos(\omega_7+\omega_4)}{O_1O_3\cos\omega_{11}\cos\omega_{10}} = \frac{\cos(\omega_7+\omega_4)}{\cos\omega_{10}\cos\omega_{11}}. \qquad \text{(IV.86)}$$

Проекция отрезка O_1O_3 на плоскость треугольника $O_1B_1B_2'$ будет равна

$$O_1O_{3_{пр}}O_1B_1B_2' = \frac{O_3O_9}{\cos\omega_{13}} = \frac{l\operatorname{ctg}\omega_{10}}{\cos\omega_{13}}.$$

Отсюда определяем величину отрезка O_1O_{10} (рис. 15):

$$O_1O_{10} = O_1O_{3_{пр}}O_1B_1B_2'\sin(180^\circ - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13}) =$$

$$= \frac{l\operatorname{ctg}\omega_{10}\sin(180^\circ - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13})}{\cos\omega_{13}}.$$

Определим величину B_1B_3 (рис. 15):

$$B_1B_3 = l_1 \operatorname{tg} \frac{\omega_2}{2}.$$

Определим величину O_1O_{11} и назовем ее l':

$$l' = \frac{k_3}{\sin \alpha_2} + \frac{l \operatorname{ctg} \omega_{10} \sin (180° - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13})}{\cos \omega_{13}}. \qquad \text{(IV.87)}$$

Задача нахождения венца 2-й шарошки, пересекающегося с заданным венцом точки B_1 1-й шарошки, сводится к определению величины l_x (рис. 15). Величина l_x есть расстояние искомой плоскости венца от плоскости точки B_2. На рис. 15 линия пересечения плоскости венца 1-й шарошки с искомой плоскостью венца шарошки 2-й обозначена через B_4. Из точки B_3 проведем линию B_3B_6, параллельную оси 2-й шарошки. Нетрудно убедиться, что угол $B_4B_3B_6$ будет равен:

$$\angle B_4B_3B_6 = \omega_2 - 90°.$$

Следовательно,

$$B_3B_4 = \frac{l' + l_x}{\cos (\omega_2 - 90°)};$$

$$B_1B_4 = l_1 \operatorname{tg} \frac{\omega_2}{2} + \frac{l' + l_x}{\cos (\omega_2 - 90°)};$$

$$O_2O_{11} = O_1O_{3пр}O_1B_1B_2 \cos (180° - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13}) =$$

$$= \frac{l \operatorname{ctg} \omega_{10} \cos (180° - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13})}{\cos \omega_{13}};$$

$$B_7B_4 = l_1 \operatorname{tg} \frac{\omega_2}{2} + (l' + l_x) \operatorname{tg} (\omega_2 - 90°);$$

$$B_5B_4 = B_7B_4 - O_2O_{11} = l_1 \operatorname{tg} \frac{\omega_2}{2} + (l' + l_x) \operatorname{tg} (\omega_2 - 90°) -$$

$$- \frac{l \operatorname{ctg} \omega_{10} \cos (180° - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13})}{\cos \omega_{13}}.$$

На рис. 15 даны согнутые по линии $B_4 - B_4$ и совмещенные виды на плоскости B_7B_4 и B_4B_1 по стрелкам A и B. На рис. 16 дана схема, к которой может быть приведена шарошка любой конструкции и конфигурации. Из этой схемы видно, что

$$a_1 = (l_1 + f_1) \operatorname{tg} \beta_1,$$

$$a_x = (l_1 + f_2 + l_x) \operatorname{tg} \beta_2,$$

точкой пересечения венцов 1-й и 2-й шарошек является точка B_4^* (рис. 15). Определяем величину B_1B_4':

$$B_1B_4' = B_1B_4 = l_1 \operatorname{tg} \frac{\omega_2}{2} + \frac{l'}{\cos (\omega_2 - 90°)} + \frac{l_x}{\cos (\omega_2 - 90°)},$$

$$B_4'B_5' = B_4B_5 = l_1 \operatorname{tg} \frac{\omega_2}{2} + l' \operatorname{tg} (\omega_2 - 90°) -$$

$$- \frac{l \operatorname{ctg} \omega_{10} \cos (180° - \omega_2 - \omega_{12} - \omega_{13})}{\cos \omega_{13}} + l_x \operatorname{tg} (\omega_2 - 90°).$$

Определяя из рис. 15 величину отрезка $B_4' B_4''$ и приравнивая значения, полученные с видов по стрелкам A и B, получаем

$$\sqrt{a_1^2-\left(l_1\operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2}+\frac{l'}{\cos(\omega_2-90^\circ)}+\frac{l_x}{\cos(\omega_2-90^\circ)}\right)^2}=$$

$$=l+\sqrt{a_x^2-\left[l_1\operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2}+l'\operatorname{tg}(\omega_2-90^\circ)-\right.}\cdots\rightarrow$$

$$\cdots\rightarrow\left.-\frac{l\operatorname{ctg}\omega_{10}(\cos 180^\circ-\omega_2-\omega_{12}-\omega_{13})}{\cos\omega_{13}}+l_x\operatorname{tg}(\omega_2-90^\circ)\right].$$

Заменяя величины a_1 и a_x значениями их, которые были получены выше, мы получим уравнение четвертой степени по неизвестному l_x:

$$l_x^4+B_1l_x^3+B_2l_x^2+B_3l_x+B_4=0, \qquad \text{(IV.88)}$$

где

$$B_1=-\frac{2}{C_6}[C_2-C_4];$$

$$B_2=\frac{1}{C_6^2}\{(C_2-C_4)^2-2C_6[C_1-C_3-l^2]-4l^2C_5\};$$

$$B_3=\frac{2}{C_6^2}\{[C_1-C_3-l^2][C_2-C_4]-2l^2C_4\};$$

$$B_4=\frac{1}{C_6^2}\{[C_1-C_3-l^2]^2-4l^2C_3\};$$

$$C_1=\left\{(l_1+f_1)^2\operatorname{tg}^2\beta_1-\left[l_1\operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2}+\frac{l'}{\cos(\omega_2-90^\circ)}\right]^2\right\};$$

$$C_2=\left\{-2\left[l_1\operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2}+\frac{l'}{\cos(\omega_2-90^\circ)}\right]\frac{1}{\cos(\omega_2-90^\circ)}\right\};$$

$$C_3=\left\{(l_1+f_2)^2\operatorname{tg}^2\beta_2-\left[l_1\operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2}-l'\operatorname{tg}(\omega_2-90^\circ)-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{l\operatorname{ctg}\omega_{10}\sin(270^\circ-\omega_2-\omega_{12}-\omega_{13})}{\cos\omega_{13}}\right]^2\right\};$$

$$C_4=\left\{2(l_1+f_2)\operatorname{tg}^2\beta_2+2\left[l_1\operatorname{tg}\frac{\omega_2}{2}-l'\operatorname{tg}(\omega_2-90^\circ)-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{l\operatorname{ctg}\omega_{10}\sin(270^\circ-\omega_2-\omega_{12}-\omega_{13})}{\cos\omega_{13}}\right]\operatorname{tg}(\omega_2-90^\circ)\right\};$$

$$C_5=\{\operatorname{tg}^2\beta_2-\operatorname{tg}^2(\omega_2-90^\circ)\};$$

$$C_6=\frac{1}{\cos^2\beta_2}.$$

Корни уравнения (IV.88) находят так же, как и уравнения (IV.46). Отличны только значения коэффициентов. Поэтому выражения для корней l_x пишутся так же, как в формулах (IV.51), (IV.52), (IV.53), (IV.54), (IV.55) и (IV.56).

При $(E_6^2 + E_5^3) < 0$

$$l_{x_1} = \frac{1}{2}\left\{+\sqrt[3]{\mp 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} + \right.$$

$$+\sqrt[3]{\pm 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[60^\circ - \frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} +$$

$$\left.+\sqrt[3]{\pm 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[60^\circ + \frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]}\right\} - \frac{E_1}{4}; \quad (IV.89)$$

$$l_{x_2} = \frac{1}{2}\left\{-\sqrt[3]{\mp 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} + \right.$$

$$+\sqrt[3]{\pm 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[60^\circ - \frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} -$$

$$\left.-\sqrt[3]{\pm 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[60^\circ + \frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]}\right\} - \frac{E_1}{4}, \quad (IV.90)$$

$$l_{x_3} = \frac{1}{2}\left\{+\sqrt[3]{\mp 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} - \right.$$

$$-\sqrt[3]{\pm 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[60^\circ - \frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} -$$

$$\left.-\sqrt[3]{\pm 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[60^\circ + \frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]}\right\} - \frac{E_1}{4}, \quad (IV.91)$$

$$l_{x_4} = \frac{1}{2}\left\{+\sqrt[3]{\mp 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} - \right.$$

$$-\sqrt[3]{\pm 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[60^\circ - \frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} +$$

$$\left.+\sqrt[3]{\pm 2\sqrt{|E_5|}\cos\left[60^\circ + \frac{1}{3}\arccos\frac{|E_6|}{|E_5|^{3/2}}\right] - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]}\right\} - \frac{E_1}{4}. \quad (IV.92)$$

При $(E_6^2 + E_5^3) > 0$

$$l_{x_1} = \frac{1}{2}\left\{+\sqrt[3]{\Gamma_1 + \Gamma_2 - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]} + \right.$$

$$\left.+2\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2} - \frac{2}{3}\left[E_2 - \frac{3}{8}E_1^2\right]\right)^2 + \frac{3}{4}(\Gamma_2 - \Gamma_1)^2} + \right.}\right.$$

$$+\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)\Bigg]\Bigg\}-\frac{B_1}{4}, \qquad \text{(IV.93)}$$

$$l_{x_2}=\frac{1}{2}\Bigg\{+\sqrt{\Gamma_1+\Gamma_2-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]}-$$

$$-2\sqrt{\frac{1}{2}\Bigg[\sqrt{\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)^2+\frac{3}{4}(\Gamma_2-\Gamma_1)^2}+$$

$$+\left(-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}-\frac{2}{3}\left[B_2-\frac{3}{8}B_1^2\right]\right)\Bigg]}\Bigg\}-\frac{B_1}{4}. \qquad \text{(IV.94)}$$

В тех членах приведенных выражений, где указан двойной знак $\pm$ или $\mp$, верхний знак берется, когда $B_6>0$, а нижний, когда $B_6<0$. Знаки, около которых имеются обозначения *, указаны для случая, когда величина

$$\left[\frac{1}{8}B_1^3-\frac{1}{2}B_1B_2+B_3\right]<0.$$

Если эта величина будет >0, то указанные знаки должны быть противоположными.

Вычислив величину l_x, можно определить положение венца соседней шарошки, который будет соприкасаться с венцом 1-й шарошки, находящимся на расстоянии f_1+l_1 от вершины 1-й шарошки. Он находится на расстоянии $(f_2+l_1+l_x)$ от вершины 2-й шарошки. Если венец находится на расстоянии l_n от вершины 2-й шарошки, то зазор равен:

$$l_0=l_n-f_2-l_1-l_x. \qquad \text{(IV.95)}$$

Если задан зазор l_0, то расстояние l_n будет равно:

$$l_n=f_2+l_1+l_x+l_0. \qquad \text{(IV.96)}$$

Определение радиальных зазоров между соседними шарошками

Для определения радиальных зазоров между зубцами и телом во впадинах шарошек вернемся к рассмотрению рис. 14. Определим углы между осями 1-й и 2-й шарошек и линией, соединяющей точки B_1 и B_2, лежащие на этих осях. Горизонтальная проекция отрезка O_2B_2 будет равна

$$O_2B_{2\text{гор}}=l_1\cos\alpha_2.$$

Горизонтальная проекция отрезка O_3B_2 будет равна

$$O_3B_{2\text{гор}}=\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2.$$

Горизонтальная проекция расстояния точки B_2 от оси 1-й шарошки будет равна

$$B_2B_{2\text{гор}}'''=B_2O_{3\text{гор}}\cos(\omega_1-90°)+O_1O_3\sin\omega_7=$$

$$=\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos(\omega_1-90°)+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}.$$

Горизонтальная проекция отрезка B_1B_2''' будет равна:

$$B_1B_{2\text{гор}}''' = B_2O_{3\text{гор}}\sin(\omega_1-90°) - O_1O_3\cos\omega_7 + O_1B_{1\text{гор}} =$$

$$= \left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin(\omega_1-90°) - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}} + l_1\cos\alpha_1.$$

Вертикальная проекция отрезка B_1B_2 будет равна:

$$B_2B_{2\text{верт}}''' = B_2O_{3\text{верт}} - O_1B_{1\text{верт}} = \left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1.$$

Тогда расстояние между точками B_1 и B_2 будет равно:

$$B_1B_2 = \sqrt{B_2B_{2\text{гор}}'''^2 + B_1B_{2\text{гор}}'''^2 + B_2B_2'''''^2} =$$

$$= \sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1 + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 + \left[l_1\cos\alpha_1 - \right.}$$

$$\left. - \left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+ \left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2}.$$

Находим горизонтальную проекцию линии $O_3B_{1\text{гор}}$:

$$O_3B_{1\text{гор}} = \sqrt{O_1O_3^2 + O_1B_{1\text{гор}}^2 - 2O_1O_3O_1B_{1\text{гор}}\cos\omega_7} =$$

$$= \sqrt{\frac{l^2}{\sin^2\omega_{10}\cos^2\omega_{11}} + l_1^2\cos^2\alpha_1 - \frac{2l_1l\cos\alpha_1\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}}.$$

Вертикальная проекция линии O_3B_1 будет равна:

$$O_3B_{1\text{верт}} = l_1\sin\alpha_1.$$

Весь отрезок O_3B_1 будет равен:

$$O_3B_1 = \sqrt{O_3B_{1\text{гор}}^2 + O_3B_{1\text{верт}}^2} = \sqrt{\frac{l^2}{\sin^2\omega_{10}\cos^2\omega_{11}} + l_1^2 - \frac{2l_1l\cos\alpha_1\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}}.$$

На рис. 20 дан вид на треугольник $B_1B_2O_3$. Линия B_2O_3 находится на оси 2-й шарошки.

Определим угол ω_{14} между осью 2-й шарошки и линией B_1B_2:

$$\cos\omega_{14} = \frac{B_2O_3^2 + B_1B_2^2 - B_1O_3^2}{2B_2O_3B_1B_2} = \frac{Л_1}{Л_2},$$

где

$$Л_1 = \left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)^2 + \left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1 + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+ \left[l_1\cos\alpha_1 - \left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+ \left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2 - \frac{l^2}{\sin^2\omega_{10}\cos^2\omega_{11}} -$$

$$-l_1^2+\frac{2l_1 l\cos\alpha_1\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}};$$

$$Л_2=2\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\right.}\cdots\rightarrow$$

$$\rightarrow\cdots\overline{\left.+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1-\right.}\rightarrow\cdots$$

$$\rightarrow\cdots\overline{\left.-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l_1\sin\alpha_1\right]^2}.$$

Вид на треугольник $B_1B_2O_1$

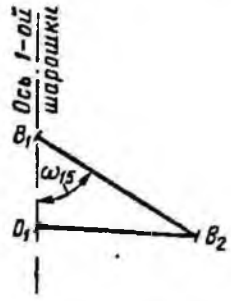


Рис. 19. Положение центров венцов шарошек.

Вид на треугольник $B_1B_2O_3$

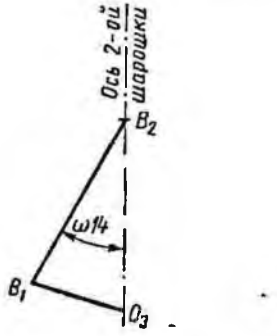


Рис. 20. Положение центров венцов шарошек.

Определим угол между линией B_1B_2 и осью 1-й шарошки. Отрезок $B_2'''O_1$ определится так:

$$B_2'''O_1=B_1B_{2\text{гор}}'''-O_1B_{1\text{гор}}=\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin(\omega_1-90^\circ)+$$

$$+\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}.$$

Определим расстояние между точкой B_2 и точкой пересечения оси 1-й шарошки с горизонтальной плоскостью долота O_1:

$$O_1B_2=\sqrt{B_2B_{2\text{верт}}'''^2-B_2'''O_1^2+B_2B_{2\text{гор}}'''^2}=$$

$$=\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+}\cdots\rightarrow$$

$$\rightarrow\cdots\overline{+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1+\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)^2\sin^2\alpha_2}.$$

На рис. 19 дан вид на треугольник $B_1B_2O_1$.

Линия O_1B_1 находится на оси 1-й шарошки. Определим угол ω_{15} между осью 1-й шарошки и линией B_1B_2:

$$\cos\omega_{15}=\frac{O_1B_1^2+B_1B_2^2-O_1B_2^2}{2O_1B_1B_1B_2}=\frac{Л_3}{Л_4},$$

где

$$Л_3 = l_1^2 + \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2 \sin\omega_1 + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+ \left[l_1\cos\alpha_1 - \left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+ \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2 - \left[\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}} + \right.$$

$$+ \left.\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1\right]^2 - \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 + \right.$$

$$+ \left.\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 - \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2\right]^2;$$

$$Л_4 = 2l_1\sqrt{\left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1 + \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 + \cdots}$$

$$\cdots + \left[l_1\cos\alpha_1 - \left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 + \cdots$$

$$\cdots + \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2}.$$

Линия B_1B_2 пересекает конусы 1-й и 2-й шарошек. Найдем величины отрезков, оставляемых конусами шарошек на линии B_1B_2. На рис. 17 дан вид на треугольник $B_1B_2O_3$ с изображением конуса 2-й шарошки. На рис. 17 точка F_2 является вершиной 2-й шарошки, β_2 — углом конуса 2-й шарошки, а a_2 — радиусом 2-й шарошки в плоскости, перпендикулярной к оси 2-й шарошки в точке B_2. Угол $E_2'B_2E_2'''$ будет равен $(90° - \omega_{14})$, так как B_2E_2' перпендикулярна к оси 2-й шарошки:

$$\angle E_2'''E_2'B_2 = 90° - \beta_2,$$

$$\angle B_2E_2'''E_2' = \omega_{14} + \beta_2.$$

Отрезок, составляемый конусом 2-й шарошки на линии B_2B_1, будет равен

$$B_2E_2''' = a_2\frac{\sin(90° - \beta_2)}{\sin(\omega_{14} + \beta_2)}.$$

Расстояние точки пересечения линии B_1B_2 с конусом 2-й шарошки от ее вершины определится так:

$$F_2E_2''' = B_2E_2'''\frac{\sin\omega_{14}}{\sin\beta_2} = a_2\frac{\sin(90° - \beta_2)\sin\omega_{14}}{\sin(\omega_{14} + \beta_2)\sin\beta_2}.$$

Для определения отрезка, оставляемого конусом 1-й шарошки на линии B_1B_2, обращаемся к треугольнику $B_1B_2O_1$, изображенному на рис. 18. Точка F_1 является здесь вершиной 1-й шарошки, β_1 — углом конуса этой шарошки, а a_1 — радиусом венца в плоскости,

перпендикулярной к оси 1-й шарошки в точке B_1. Угол $E_1'B_1E_1'''$ будет равен $(90° - \omega_{15})$, так как B_1E_1' перпендикулярна к оси 1-й шарошки:

$$\angle B_1E_1'E_1''' = 90° - \beta_1,$$

$$\angle B_1E_1'''E_1' = \omega_{15} + \beta_1.$$

Отрезок, оставляемый конусом 1-й шарошки на линии B_2B_1, будет равен

$$B_1E_1''' = a_1 \frac{\sin(90° - \beta_1)}{\sin(\omega_{15} + \beta_1)}.$$

Следовательно, глубина внедрения конуса 1-ой шарошки в конус 2-й по линии B_1B_2, будет равна

$$E_1'''E_2''' = B_1E_1''' + B_2'E_2''' - B_1B_2 = a_1 \frac{\sin(90° - \beta_1)}{\sin(\omega_{15} + \beta_1)} + a_2 \frac{\sin(90° - \beta_2)}{\sin(\omega_{14} + \beta_2)} -$$

$$- \sqrt{\left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2 \sin\omega_1 + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +}$$

$$+ \left[l_1\cos\alpha_1 - \left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1 - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 +$$

$$+ \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2},$$

так как плоскость треугольника $B_1B_2O_3$ проходит через ось 2-й шарошки, то наименьшее расстояние точки E_1''' от поверхности конуса 2-й шарошки будет определяться именно в этой плоскости. Проведя линию $E_1'''E_2''''$, перпендикулярно к образующей конуса 2-й шарошки, определим это расстояние:

$$E_1'''E_2'''' = E_1'''E_2'''\sin(\omega_{14} + \beta_2) = \sin(\omega_{14} + \beta_2)\left[a_1\frac{\sin(90° - \beta_1)}{\sin(\omega_{15} + \beta_1)} + \right.$$

$$+ a_2\frac{\sin(90° - \beta_2)}{\sin(\omega_{14} + \beta_2)} - \sqrt{\left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1 + \right.}$$

$$\left. + \frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 + \left[l_1\cos\alpha_1 - \left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1 - \right.$$

$$\left. - \frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2 + \left[\left(l_1 + \frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2 - l_1\sin\alpha_1\right]^2\Big].$$

Для более удобной координации точки E_2'''' определим ее расстояние от вершины 2-й шарошки — точки F_2:

$$F_2E_2''' = F_2E_2''' + E_1'''E_2''''\cos(\omega_{14} + \beta_2) = a_2\frac{\sin(90° - \beta_2)\sin\omega_{14}}{\sin(\omega_{14} + \beta_2)\sin\beta_2} +$$

$$+ \cos(\omega_{14} + \beta_2)\left[a_1\frac{\sin(90° - \beta_1)}{\sin(\omega_{15} + \beta_1)} + a_2\frac{\sin(90° - \beta_2)}{\sin(\omega_{14} + \beta_2)} - \right.$$

$$-\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$

$$+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l_1\sin\alpha_1\right]^2\Big].$$

Отложим точку E_2''' на рис. 18. Расстояние точки пересечения линии B_1B_2 с конусом 1-й шарошки от ее вершины определится так:

$$F_1E_1'''=B_1E_1'''\frac{\sin\omega_{15}}{\sin\beta_1}=a_1\frac{\sin(90^\circ-\beta_1)\sin\omega_{15}}{\sin(\omega_{15}+\beta_1)\sin\beta_1}.$$

Расстояние точки E_1'''' от вершины 1-й шарошки определится так:

$$F_1E_1''''=F_1E_1'''+E_1'''E_2'''\cos(\omega_{15}+\beta_1)=a_1\frac{\sin(90^\circ-\beta_1)\sin\omega_{15}}{\sin(\omega_{15}+\beta_1)\sin\beta_1}+$$

$$+\cos(\omega_{15}+\beta_1)\left[a_1\frac{\sin(90^\circ-\beta_1)}{\sin(\omega_{15}+\beta_1)}+a_2\frac{\sin(90^\circ-\beta_2)}{\sin(\omega_{14}+\beta_2)}-\right.$$

$$-\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$

$$+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l_1\sin\alpha_1\right]^2\Big].$$

Глубина же внедрения 2-й шарошки внутрь конуса 1-й шарошки будет равна

$$E_2''''E_1''''=E_1'''E_2'''\sin(\omega_{15}+\beta_1)=\sin(\omega_{15}+\beta_1)\left[a_1\frac{\sin(90^\circ-\beta_1)}{\sin(\omega_{15}+\beta_1)}+\right.$$

$$+a_2\frac{\sin(90^\circ-\beta_2)}{\sin(\omega_{14}+\beta_2)}-\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$

$$+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l_1\sin\alpha_1\right]^2\Big].$$

Обозначая глубину выточки канавки межвенцового пространства шарошки в данной точке через m_1, зазор t между телом шарошки и венцом соседней шарошки определим так:

$$t_1=m_1-\sin(\omega_{15}+\beta_1)\left[a_1\frac{\sin(90^\circ-\beta_1)}{\sin(\omega_{15}+\beta_1)}+a_2\frac{\sin(90^\circ-\beta_2)}{\sin(\omega_{14}+\beta_2)}-\right.$$

$$-\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+}$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\cos\omega_1-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$

$$+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l_1\sin\alpha_1\right]^2\Bigg]. \qquad \text{(IV.97)}$$

Если же нужно определить глубину выточки канавки в шарошке по заданной величине зазора, то

$$m_1=t_1+\sin(\omega_{15}+\beta_1)\left[a_1\frac{\sin(90^\circ-\beta_1)}{\sin(\omega_{15}+\beta_1)}+a_2\frac{\sin(90^\circ-\beta_2)}{\sin(\omega_{14}+\beta_2)}-\right.$$

$$-\sqrt{\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1+\frac{l\sin\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+}$$

$$+\left[l_1\cos\alpha_1-\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\cos\alpha_2\sin\omega_1-\frac{l\cos\omega_7}{\sin\omega_{10}\cos\omega_{11}}\right]^2+$$

$$+\left[\left(l_1+\frac{k_b}{\sin\alpha_2}\right)\sin\alpha_2-l_1\sin\alpha_1\right]^2\Bigg]. \qquad \text{(IV.98)}$$

Таким образом определены глубина внедрения венцов в тело соседней шарошки m_1 на расстоянии F_1E_1'''' от вершины конуса шарошки.

Задаваясь другими величинами l_n, можно таким же образом определить глубины внедрений m_n на расстояниях F_nE_n'''' от вершины шарошки. Если шарошка имеет несколько разных конусов, то при определении точек пересечений и зазоров для каждого венца надо брать параметры (f, β) конуса, на котором он расположен. Таким путем можно определить зазоры в любой точке шарошки.

Приближенные графические способы нахождения зазоров между венцами шарошек, а также между венцами и углублениями во впадинах шарошек

Приближенно, но с достаточной точностью зазоры между венцами соседних шарошек могут быть определены графически. Возможность эта обусловлена линейным характером зависимости места положения точки пересечения венцов от расстояния ее от вершины по оси шарошки. Для определения точек пересечения венцов соседних шарошек воспользуемся проекциями, изображенными на рис. 15. Проведем последовательно определение точек пересечения венцов соседних шарошек на рис. 21.

Определяем точку пересечения венца 1-й шарошки, центр которого находится в точке B_1. Для этого, построив виды по стрелке E и совмещенные проекции по стрелкам $Г$ и B, отложим точку B_1 на осях 1-й шарошки в этих проекциях. Выбрав на 2-й шарошке два произвольных венца, центры которых находятся в произвольных точках B_2 и $2'$ на оси 2-й шарошки, откладываем их на видах по стрелкам E, $Г$ и B. Откладывая из точки B_1 на виде по стрелке $Г$ линию B_1-1 и от линии $1-1$ отрезок $B_{21}-1$ на оси 2-й шарошки,

находим центр венца B_{21} по стрелке B. Проводя из этого центра окружность венца $B_2 - 1''$ находим точку $1''$ пересечения ее с линией $1-1$.

Откладывая из точки B_1 на виде по стрелке $Г$ линию $B_1 - 2$ и от линии $2-2$ отрезок $B_{21} - 2$ на оси 2-й шарошки, находим

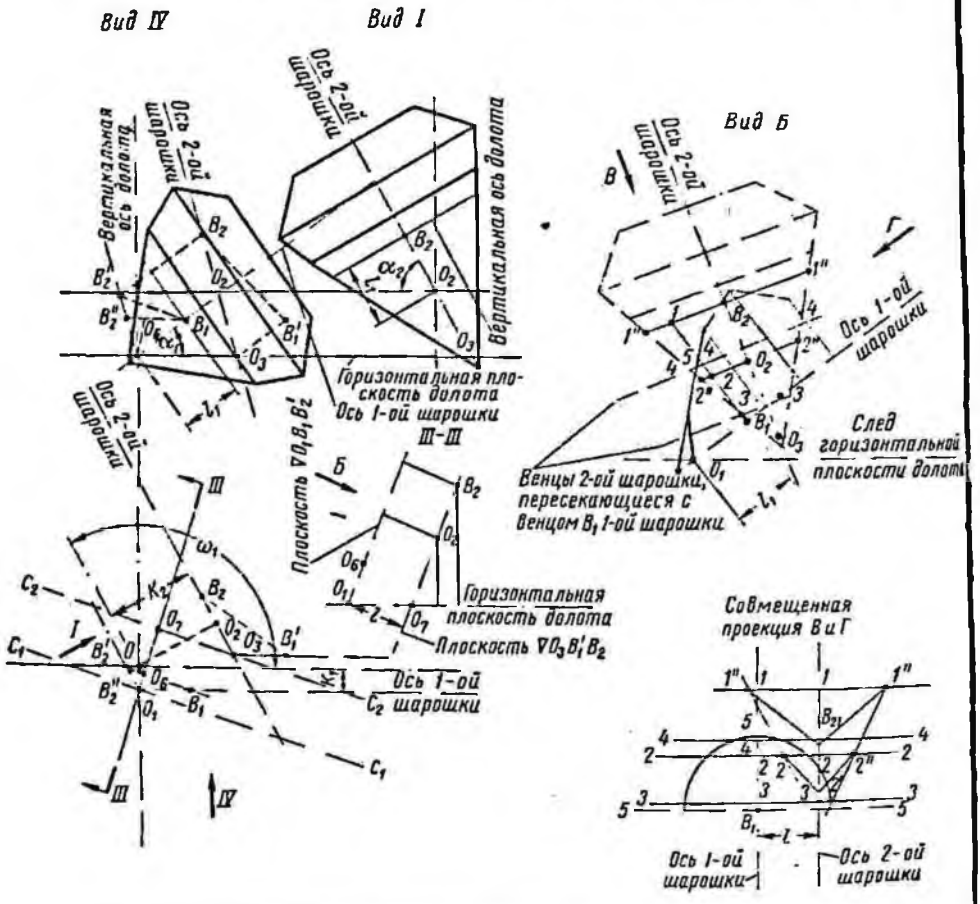


Рис. 21. Графическое нахождение точек пересечения соседних шарошек.

центр венца $2'$ в виде по стрелке B. Проводя из этого центра окружность венца $2'-2''$, находим точку $2''$ пересечения ее с линией $2-2$. Линия, проведенная через точки $1''$ и $2''$, определяет линейный закон положения точек пересечения окружностей венцов 2-й шарошки с соответствующими хордами заданного венца 1-й шарошки. Проведя через точку пересечения линии $2'' - 1''$ с окружностью венца B_1 1-й шарошки линию $4-4$ и отложив линии $B_1 - 4$ в проекции по стрелке $Б$ определяем соответствующий венец второй шарошки $4'$, пересекающийся с венцом шарошки B_1.

Производя аналогичное построение в правой части совмещенных проекций по стрелкам $Г$ и B_1 находим второй венец 2-й шарошки, пересекающийся с венцом B_1 1-й шарошки. Таким образом отыскивается венец $3''$. Как видно из построения, венец $3'$ ближе к вершине 2-й шарошки, и поэтому является крайним венцом 2-й шарошки, от которого надо отсчитывать допустимые зазоры и определять положения крайнего венца следующей шарошки. Нанеся на данном

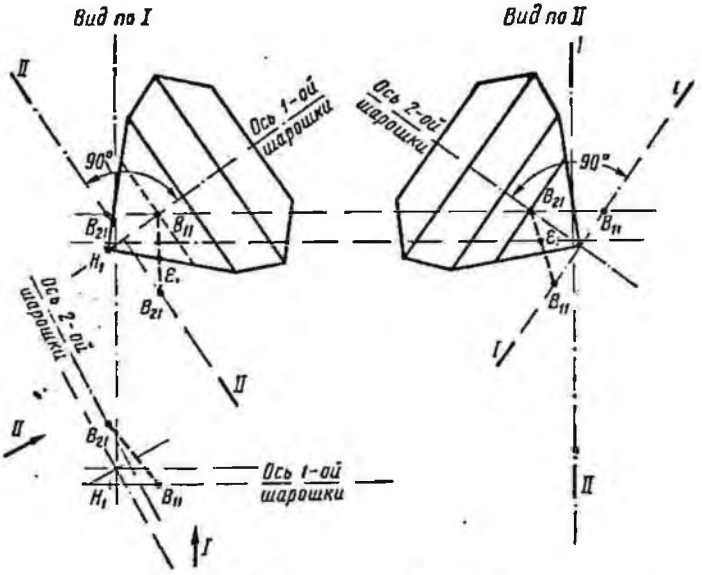


Рис. 22. Построение зазоров.

построении положение всех венцов шарошки, находим венцы других шарошек, находящихся на допустимых расстояниях от этих заданных венцов.

Графическое определение зазоров между венцами зубьев и стенками соседних шарошек во впадинах осложняется тем обстоятельством, что в общем случае не существует такой плоскости, в которой можно было бы расположить оси соседних шарошек, так как они не пересекаются между собой. Поэтому для определения зазоров приходится производить условную развертку плоскостей, в которых расположены оси соседних шарошек, как показано на рис. 22. Здесь дан вид по стрелке I на плоскость, в которой находится ось 1-й шарошки и точка B_{21} на оси 2-й шарошки. Таким образом, ось и весь конус 1-й шарошки проектируется здесь без искажений, в своем натуральном виде. Линия $B_{21}H_1$, а также расстояния $B_{11}B_{21}$ и E_1B_{21} также при этом не искажаются.

Выбирая другие точки B_{1n} на оси 1-й шарошки и соответствующие им точки B_{2n} на оси 2-й шарошки, производится

аналогичным образом нахождение расстояний E_nB_{2n} других венцов шарошек.

Все приведенное построение не приводит к нахождению проекции или вида, в которых расположены оси соседних шарошек, однако оно дает возможность определить зазоры во впадинах шарошек. Точность графических методов определения зазоров зависит от масштаба построения и может практически достигать любых пределов. Поэтому ими рекомендуется пользоваться на практике, применяя аналитические расчеты по приведенным выше формулам только в специальных случаях (например, при анализе влияния допусков).

Расчет зубьев шарошек

Для определения параметров зубьев шарошек расчет ведется по методике В. М. Славского.

Задача расчета геометрических элементов зубьев шарошек заключается в определении размеров фрезы, нарезающей зубья,

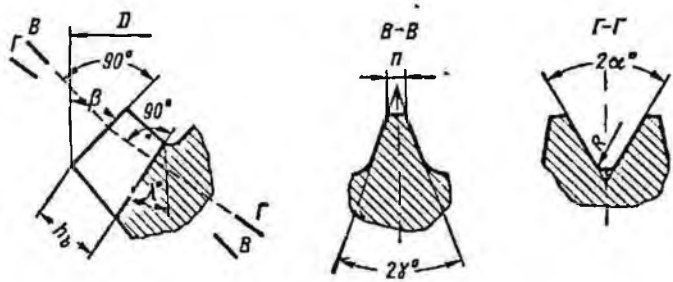


Рис. 23. Схемы зубьев.

а также угла установки ее на станке при заданных параметрах (2γ, n, h_b). Зубья шарошки и обозначения их параметров показаны на рис. 23.

Расчет проводится в следующей последовательности.

Задаваясь требуемыми параметрами зуба шарошки — притуплением зуба n_1, числом зубьев венца z, углом заострения фрезы 2α, определяем:

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\beta\cos\frac{180^\circ}{z}.$$

Здесь δ — промежуточный параметр;

$$\sin(\delta-\lambda) = \operatorname{ctg}\alpha\operatorname{tg}\frac{180^\circ}{z}\sin\delta;$$

$$\varphi = \beta - \lambda;$$

φ — промежуточный параметр;

$$\operatorname{tg}\alpha' = \operatorname{tg}\alpha\cos\lambda;$$

Таблица 16

Шифр	D, мм		l, мм		R, мм		n, мм	m, мм
	размер	допуск	размер	допуск	размер	допуск		
1СЦ4Х8	4.14	—0.03	8	—0.25 —0.35	2.3	±0.15	0.4÷0.5	D—0,1
1СЦ4Х6	4.14	—0.03	6	—0.2 —0.3	2.3	±0.15	0.4÷0.5	D—0,1
1СЦ4Х5,5	4.14	—0.03	5.5	—0.2 —0.3	2.3	±0.15	0.4÷0.5	D—0,1
1СЦ5Х10	5.14	—0.03	10	—0.25 —0.35	2.8	±0.15	0.4÷0.5	D—0,1
1СЦ5Х8	5.14	—0.03	8	—0.25 —0.35	2.8	±0.15	0.4÷0.5	D—0,1
1СЦ5Х7	5.14	—0.03	7	—0.25 —0.35	2.8	±0.15	0.4÷0.5	D—0,1
1СЦ5Х6,5	5.14	—0.03	6.5	—0.2 —0.3	2.8	±0.15	0.4÷0.5	D—0,1
1СЦ6Х12	6.14	—0.03	12	—0.3 —0.4	3.4	±0.2	0.5÷0.6	D—0,1
1СЦ6Х10	6.14	—0.03	10	—0.25 —0.35	3.4	±0.2	0.5÷0.6	D—0,1
1СЦ6Х9	6.14	—0.03	9	—0.25 —0.35	3.4	±0.2	0.5÷0.6	D—0,1
1СЦ6Х8	6.14	—0.03	8	—0.25 —0.35	3.4	±0.2	0.5÷0.6	D—0,1
1СЦ8Х16	8.14	—0.03	16	—0.3 —0.14	4.5	±0.25	0.8÷1.0	D—0,2
1СЦ8Х14	8.14	—0.03	14	—0.3 —0.4	4.5	±0.25	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ8Х12	8.14	—0.03	12	—0.3 —0.4	4.5	±0.25	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ8Х10	8.14	—0.03	10	—0.25 —0.35	4.5	±0.25	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ10Х20	10.14	—0.03	20	—0.4 —0.5	5.5	±0.25	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ10Х16	10.14	—0.03	16	—0.3 —0.4	5.5	±0.25	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ10Х14	10.14	—0.03	14	—0.3 —0.4	5.5	±0.25	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ10Х12	10.14	—0.03	12	—0.3 —0.4	5.5	±0.25	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ12Х24	12.14	—0.03	24	—0.4 —0.5	6.5	±0.3	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ12Х18	12.14	—0.03	18	—0.4 —0.5	6.5	±0.3	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ12Х14	12.14	—0.03	14	—0.3 —0.4	6.5	±0.3	0.8—1.0	D—0,2
1СЦ14Х24	14.14	—0.03	24	—0.4 —0.5	7.5	±0.35	0.8—1.0	D—0,2

Таблица 17

Шифр	D, мм		l, мм		n, мм	m, мм
	размер	допуск	размер	допуск		
2СЦ3Х3	3.14	−0.03	3	−0.15 −0.25	0.4—0.5	$D-0,1$
2СЦ4Х4	4.14	−0.03	4	−0.15 −0.25	0.4—0.5	$D-0,1$
2СЦ5Х5	5.14	−0.03	5	−0.2 −0.3	0.4—0.5	$D-0,1$
2СЦ5Х4	5.14	−0.03	4	−0.15 −0.25	0.4—0.5	$D-0,1$
2СЦ6Х6	6.14	−0.03	6	−0.2 −0.3	0.5—0.6	$D-0,1$
2СЦ6Х5	6.14	−0.03	5	−0.2 −0.3	0.5—0.6	$D-0,1$
2СЦ8Х8	8.14	−0.03	8	−0.25 −0.35	0.8—1.0	$D-0,2$
2СЦ8Х7	8.14	−0.03	7	−0.25 −0.35	0.8—1.0	$D-0,2$
2СЦ8Х6	8.14	−0.03	6	−0.2 −0.3	0.8—1.0	$D-0,2$
2СЦ10Х8	10.14	−0.03	8	−0.25 −0.35	0.8—1.0	$D-0,2$
2СЦ12Х10	12.14	−0.03	10	−0.25 −0.35	0.8—1.0	$D-0,2$
2СЦ12Х8	12.14	−0.03	8	−0.25 −0.35	0.8—1.0	$D-0,2$

α' — промежуточный параметр;

$$\gamma' = \alpha' - \frac{180^\circ}{z};$$

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{\operatorname{tg}\gamma'}{\cos\beta};$$

$$h_b = \frac{D}{2\sin\beta}\sin\varphi - \frac{n}{2}\operatorname{ctg}\gamma(\cos\varphi - \sin\varphi\operatorname{ctg}\beta) - R\left(\frac{1}{\sin\alpha} - 1\right).$$

Если в результате указанного расчета величины 2γ или h_e окажутся недопустимыми, то надо задаться другими значениями 2α и R фрезы и повторить расчет.

В случае, если нарезается косой зуб и наклон его к оси шарошки составляет угол ξ, то во все приведенные формулы подставляется приведенное число зубьев, которое определяется из соотношения

$$\sin\left(\frac{180^\circ}{z}\right)_{\text{прив}} = \frac{\sin\dfrac{180^\circ}{z}}{\cos\xi},$$

из которого находится $\left(\dfrac{180^\circ}{z}\right)$ приведенное.

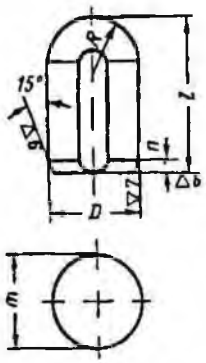
Величина 2γ для зубьев в зависимости от типа долота должна находиться в пределах $38 \div 55^\circ$.

Таблица 18

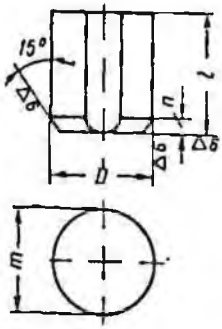
Шифр	D, мм		l, мм		R, мм		m, мм	Вес 1 шт., г
	размер	допуск	размер	допуск	размер	допуск		
3СЦ3Х5	3.14	—0.03	5	—0.2 —0.3	8	±0.15	0.5	0.6
3СЦ4Х8	4.14	—0.03	8	—0.25 —0,35	8	±0.15	0.5	1.3
3СЦ4Х6	4.14	—0.03	6	—0.2 —0.3	8	±0.15	0.5	0.9
3СЦ4Х5.5	4.14	—0.03	5.5	—0.2 —0.3	8	±0.15	0.5	0.8
3СЦ5Х10	5.14	—0,03	10	—0.25 —0.35	10	±0.15	0.5	2.5
3СЦ5Х8	5.14	—0.03	8	—0.25 —0.35	10	±0.15	0.5	2.0
3СЦ5Х7	5.14	—0.03	7	—0.25 —0.35	10	±0.15	0.5	1.7
3СЦ5Х6,5	5.14	—0.03	6,5	—0.2 —0.3	10	±0.15	0.5	1.5
3СЦ6Х12	6.14	—0.03	12	—0.3 —0.4	12	±0.15	1	4.3
3СЦ6Х10	6.14	—0.03	10	—0.25 —0.35	12	±0.15	1	3.5
3СЦ6Х9	6.14	—0.03	9	—0.25 —0,35	12	±0.15	1	3.1
3СЦ6Х8	6.14	—0.03	8	—0.25 —0.35	12	±0.15	1	2,7
3СЦ8Х16	8.14	—0,03	16	—0.3 —0.4	16	±0.15	1	10.0
3СЦ8Х14	8.14	—0.03	14	—0.3 —0.4	16	±0.15	1	8.6
3СЦ8Х12	8.14	—0.03	12	—0.3 —0.4	16	±0.15	1	7.1
3СЦ8Х11	8.14	—0.03	11	—0.3 —0.4	16	±0.15	1	6.4
3СЦ8Х10	8.14	—0.03	10	—0.25 —0.35	16	±0.15	1	5.7
3СЦ10Х20	10.14	—0.03	20	—0.4 —0.5	20	±0.15	1	19.5
3СЦ10Х16	10.14	—0.03	16	—0.3 —0.4	20	±0.15	1	15.0
3СЦ10Х14	10.14	—0.03	14	—0.3 —0.4	20	±0.15	1	13.0
3СЦ10Х13	10.14	—0.03	13	—0.3 —0.4	20	±0.15	1	11.0
3СЦ10Х12	10.14	—0.03	12	—0.3 —0.4	20	±0.15	1	10.5
3СЦ12Х20	12.14	—0.03	20	—0.4 —0.5	24	±0.2	1	21.0
3СЦ12Х24	12,14	—0.03	24	—0.4 —0.5	24	±0.2	1	34.0
3СЦ12Х18	12.14	—0.03	18	—0.4 —0.5	24	±0.2	1	24.0
3СЦ12Х16	12.14	—0.03	16	—0.3 —0.4	24	±0.2	1	20.5

Продолжение табл. 18

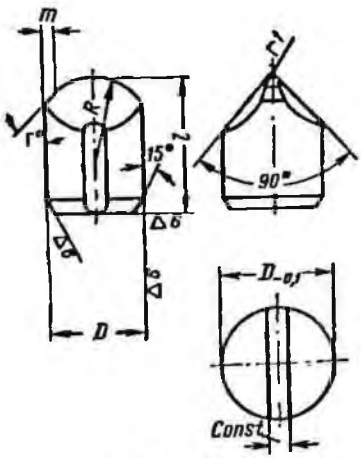
Шифр	D, мм		l, мм		R, мм		m, мм	Вес 1 шт., г
	размер	допуск	размер	допуск	размер	допуск		
3СЦ12Х14	12,14	−0,03	14	−0,3 −0,4	24	±0,2	1	17,5
3СЦ14Х24	14,14	−0,03	24	−0,4 −0,5	28	±0,2	1	44,0



К табл. 16.



К табл. 17.



К табл. 18.

В долотах, где вооружение шарошек состоит из твердосплавных зубков, закрепленных в теле шарошки, основное внимание должно быть уделено правильному подбору зазоров в отверстиях под зубки, с тем, чтобы обеспечить надежную посадку их и исключить возможность выпадения из гнезда в процессе бурения. В зависимости от типа долота, твердосплавные зубки применяются трех форм: 1СЦ (табл. 16), 2СЦ (табл. 17) и 3СЦ (табл. 18).

Зубки 1СЦ (Г-26 по ГОСТ 880-67) применяются в долотах для бурения особо-крепких пород и изготовляются из металлокерамического твердого сплава ВК8-В. Зубки 2СЦ (Г-54 по ГОСТ 880-67) применяются для повышения износостойкости тыльных конусов шарошек и иногда также спинок лап, и поскольку они утоплены внутрь конусов шарошек или лап, то требование их прочности не стоит так остро, как для других зубков. Поэтому они изготовляются из металло-керамического твердого сплава ВК6-В.

Зубки 3СЦ (Г-25 по ГОСТ 880-67) применяются в менее крепких, но сильно абразивных породах и выступают из тела шарошки на бо́льшую величину, чем зубки 1СЦ. Поэтому для исключения их поломок они изготовляются из металло-керамического твердого сплава ВК-15, имеющего бо́льшую механическую прочность.

Зубки запрессовываются в теле шарошек с натягом 0,06—0,14 *мм*.

Расчет элементов опор долот

Геометрический расчет элементов опор долота сводится к расчету зазоров в его подшипниках для обеспечения задаваемого распределения нагрузок между ними. Средний диаметр подшипника при заданных диаметрах роликов и шариков и числе их определяется из сотношения

$$D_0 = \frac{d + a_1}{\sin\frac{180^\circ}{n}},$$

где D_0 — средний диаметр подшипника; a_1 — гарантированный зазор между телами качения; n — число тел качения.

Размеры беговых дорожек определяются для цапфы лапы:

$$D_{вн} = D_{ср} - d;$$

для беговой дорожки шарошки:

$$D_ш = D_0 + d + a_2,$$

где a_2 — гарантированный радиальный зазор.

Радиальные зазоры подбираются таким образом, чтобы обеспечить необходимое распределение нагрузок между отдельными подшипниками. Например, при трехрядной схеме опоры зазоры подбирают таким образом, чтобы освободить замковый подшипник от радиальных нагрузок.

Шарики в опорах долот применяются следующих размеров: 4,762; 6,350; 7,938; 9,525; 11,113; 12,700; 14,288, 15,875; 19,050; 22,229; 25,400 *мм* с допуском по диаметру +0,05 и с сортировкой на группы через 0,01 *мм*. Ролики применяются в опорах долот размером 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 14; 15 *мм* с допуском по диаметру +0,03 *мм* и с сортировкой на группы через 0,01 *мм*.

Шарики и ролики для долот поставляются из стали марки 55СМА.

Конструкции самих опор шарошек в зависимости от размеров долот и их назначения могут быть различны.

Материалы, применяемые для деталей долот

Кроме приведенного выше расчета геометрических соотношений долот, обеспечивающих правильность их кинематики и размеров, никаких расчетов на прочность отдельных деталей ввиду неопределенности схемы нагружения и величины действующих усилий не производится. Материал и термическая обработка лап долота должна обеспечить высокую износостойкость рабочих поверхностей опор шарошек, непосредственно находящихся под воздействием высоких контактных давлений при работе в абразивной среде. Кроме того, должна быть обеспечена высокая усталостная и статическая прочность сердцевины лап при достаточной вязкости ее с целью исключения возможности поломок ее в местах с наибольшими напряжениями при возникающих значительных динамических нагрузках. Кроме того, должна быть обеспечена хорошая обрабатываемость лапы на

металлорежущих станках даже после проведения всей химико-термической обработки, а также хорошая свариваемость деталей, исключающая возможность появления больших внутренних напряжений, ведущих к искажениям форм после сварки.

Для лап долот рекомендуется сталь 14Х2Н3МА с применением следующей химико-термической обработки: цементация с непосредственной закалкой, высокий отпуск, вторая закалка и низкий отпуск. Твердость на поверхности беговых дорожек цапф должна быть *HRC* 58—62, а твердость сердцевины в пределах *HRC* 24—38 (в зависимости от размеров лап). Бурты цапф, спинки лап и резьбовые ниппели от цементации должны быть предохранены.

Материал шарошки должен обеспечить высокую износостойкость рабочих поверхностей опоры, а также высокую износостойкость и прочность разрушающих породу зубьев. Для повышения износостойкости зубьев шарошки они наплавляются твердым сплавом — релитом. Для долот диаметром 76—190 *мм* шарошки изготовляются из стали марки 17Н3МА, а для долот диаметром свыше 190 *мм* из стали 20ХН3А. Химико-термическая обработка шарошек состоит из цементации с непосредственной закалкой, высокого отпуска, второй закалки и низкого отпуска. Твердость на поверхности беговых дорожек должна быть *HRC* 57—60, а твердость тела в наименьшем сечении не свыше *HRC* 44.

Некоторые вопросы, вытекающие из анализа геометрического расчета долот

Для правильной работы долота на забое необходимо, чтобы все его шарошки в одинаковой степени разрушали забой, ось нижней части долота, определяемая положением шарошек, совпадала с осью всей бурильной колонны, смещение шарошек относительно оси долота было одинаковым для всех шарошек данного долота.

Анализируя формулы, полученные для основных параметров долота, видим, что влияние отдельных параметров сказывается неравномерно на общем результате. Так, изменяя диаметр долота 190 *мм* на 2 *мм* путем изменения смещения осей шарошек, приходится это смещение изменять на 3,5 *мм*. Такое изменение смещения оси влечет за собой изменение положения по высоте калибрующей точки шарошки на 7 *мм*. Таким образом, при изменении диаметра долота всего на 2 *мм* (что допускается некоторыми заводами) и без контроля положения шарошек после сборки долота возможна разновысотность калибрующей точки долота разными шарошками на 8 *мм* (включая 1 *мм*, допускаемый при замере разновысотности шарошек, без учета разницы смещений их относительно оси долота). Конечно, наличие такой разновысотности калибрующих точек шарошек приведет к тому, что некоторые шарошки вообще не будут обуривать стенки скважины с самого начала и до конца работы долота.

Сильно искажает параметры долота допускаемая несоосность шарошек относительно замковой резьбы. Наличие такой несоосности, помимо того биения, которое сопровождает процесс бурения

и увеличивает нагруженность самого долота, приводит также к увеличению фактического смещения осей отдельных шарошек относительно действительного центра вращения долота и еще более повышает разновысотность калибрующей точки разных шарошек (в приведенном случае она может дойти до 10 *мм*). Необходимо указать также, что само смещение оси шарошки является фактором, определяющим воздействие долота на забой, и изменять этот фактор в таких значительных пределах, какие указаны выше, явно недопустимо. Поэтому ясно, что смещение оси каждой шарошки относительно действительного центра долота необходимо достаточно точно выдерживать и проверять после окончания сборки.

В результате искажения других параметров (расстояние от оси долота до центра шарошки в плане, угла наклона оси лапы, диаметров венцов шарошек) может значительно исказиться форма забоя, образуемая отдельными шарошками, что приведет к неравномерной нагруженности их и изнашиваемости в процессе бурения. Это отрицательно отражается на стойкости как вооружения, так и опор долота и сильно сокращает его общую стойкость. Правильное, точное изготовление и сборка долот являются значительным резервом повышения их стойкости и работоспособности и должны учитываться при производстве долот.

Влияние направления смещения осей шарошек на кинематику долота

Шарошечное долото, вращаясь вокруг оси буровой колонны, испытывает воздействие сил реакций забоя. Шарошка любого долота вращается на цапфе вследствие реактивных сил забоя, действующих на нее при вращении всего долота. В долотах, у которых оси шарошек

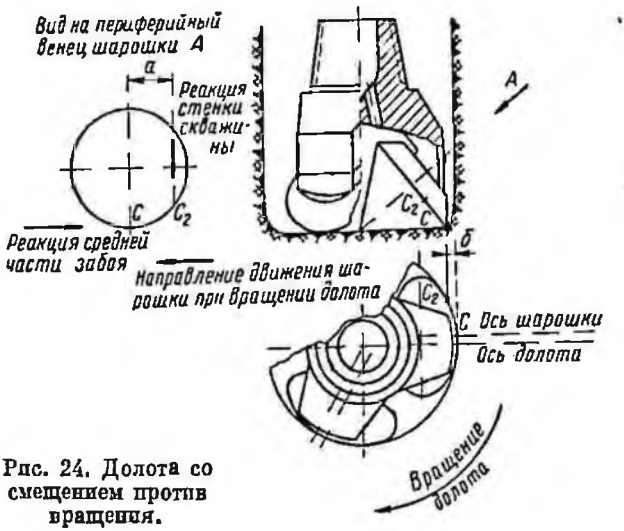


Рис. 24. Долота со смещением против вращения.

проходят через центр вращения долота, реактивные силы забоя, действующие на все зубья всех венцов шарошки, направляют вращение шарошки в одном направлении. В долотах же, в которых оси шарошек смещены относительно центра вращения долота, направление реактивных сил от стенки разбуриваемой скважины зависит от направления смещения осей шарошек.

На рис. 25 показано долото, у которого оси шарошек смещены по направлению вращения долота, а на рис. 24 долото, у которого оси шарошек смещены против направления вращения долота.

Как видно из приведенных чертежей, участок шарошки CC_1 (и соответственно CC_2) будет производить расширение скважины на

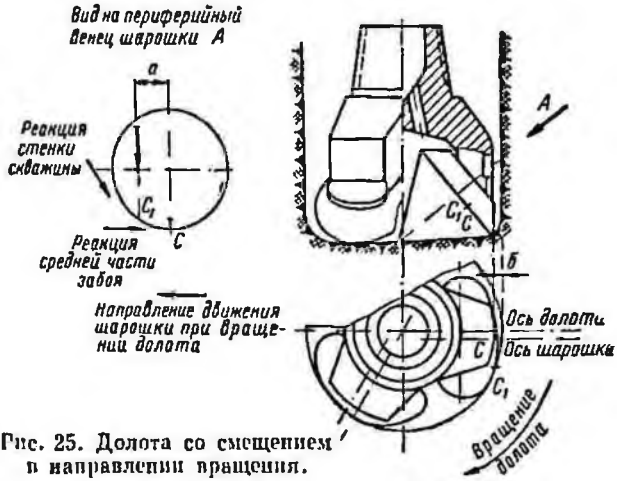


Рис. 25. Долота со смещением в направлении вращения.

величину 2б и, следовательно, реакция стенки скважины здесь всегда будет направлена сверху вниз (точка C_1 и соответственно C_2 расположены выше и в тоже время дальше от оси долота, чем точка C). Реакция средней части забоя будет в обоих случаях вращать шарошку против часовой стрелки (если смотреть на шарошку по стрелке A). Направленная же вниз реакция стенки скважины в случае, показанном на рис. 25, будет вращать шарошку против часовой стрелки, а в случае, показанном на рис. 24, по часовой стрелке, т. е. при смещении оси шарошки в сторону, обратную вращению долота, реакция стенки притормаживает шарошку. Такое притормаживание отрицательно сказывается на работе опоры шарошки, на износе зубков и, наконец, на работе забойного двигателя, поскольку для вращения долота требуются повышенный крутящий момент и дополнительная мощность для преодоления вредного торможения шарошки.

Глава V

ШАРОШЕЧНЫЕ ДОЛОТА ДЛЯ БУРЕНИЯ В КРЕПКИХ И ОСОБО КРЕПКИХ ХРУПКИХ АБРАЗИВНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

В 1959—1961 гг. на различных горных предприятиях СССР были испытаны первые конструкции штыревых шарошечных долот типа К, разработанных ВНИИБТ и нашедших до этого широкое промышленное применение при бурении глубоких нефтяных и газовых скважин в крепких абразивных породах: 6-6вК, 4Н-8К, 6Н-9К и 6-10К диаметрами соответственно 145, 190, 214 и 243 *мм*.

Эти долота имели аналогичные конструкции, состоящие из трех сваренных между собой секций-лап, на цапфах которых на трехрядных подшипниках качения смонтированы шарошки, причем в долоте 6-6вК опоры шарошек выполнены по схеме ролик — шарик — шарик, а у остальных — по схеме ролик — шарик — ролик.

Вооружение у всех долот выполнено в виде твердосплавных зубков с полусферической формой рабочей поверхности, запрессованных в тело шарошек с определенным натягом.

Все долота самоочищающегося типа, что позволило разместить в шарошках достаточно прочные и работоспособные опоры, обеспечивающие их достаточную часовую стойкость.

Для предохранения долота от износа по диаметру обратные конусы шарошек указанных долот были наплавлены зерновым твердым сплавом.

Угол наклона осей цапф лап к оси скважины у долот всех размеров составляет 52°.

На рис. 26 показан общий вид долота 6Н-9К. Долота 6-6вК, 4Н-8К, 6-10К по конструкции аналогичны долотам 6Н-9К.

Перечисленные долота были испытаны на различных горнодобывающих предприятиях страны: Лениногорском, Алтын-Топканском, Докучаевском, Ждановском комбинатах, Балаклавском рудоуправлении, Южном горнообогатительном комбинате (ЮГОК) и др.

Проведенные испытания подтвердили работоспособность конструкции этих долот. Все долота показали устойчивые и достаточно высокие результаты, превышающие в 1,5—2 раза показатели работы серийных долот, как зубчатых, так и штыревых, ДШ-10, КО7-9К, К-9Т, К-11К, К-11ТК, являвшихся до этого основным породо-

разрушающим инструментом при бурении взрывных скважин в горнорудной промышленности.

Однако в процессе отработки долот был выявлен ряд существенных недостатков, снижающих их потенциальные возможности.

Так, наплавка обратных конусов шарошек зерновым твердым сплавом не могла в достаточной степени противостоять абразивному износу и долота изнашивались по диаметру, что в значительной степени снижало показатели их работы.

На рис. 27 показан характерный износ периферийной части долота, наплавленной зерновым твердым сплавом.

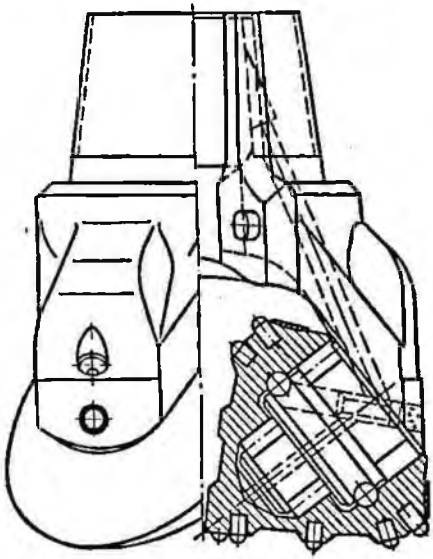


Рис. 26. Долото 6Н-9К в разрезе.

Вследствие значительного вылета зубков над телом шарошек и большого шага зубков последние часто скалывались, особенно на периферийных венцах, что также способствовало преждевременному выходу долот из строя.

Кроме того, при бурении на открытых горных работах с продувкой воздухом, особенно при недостаточной производительности компрессоров, т. е. когда забой скважины плохо очищается от выбуренной породы, опоры шарошек забивались шламом, что приводило к их преждевременному износу и заклиниванию.

Недостаточная производительность компрессоров не обеспечивает также должного охлаждения опорных подшипников шарошек, вследствие чего они подвергались значительному перегреву (иногда до цветов побежалости), приводившему к отпуску металла и быстрому его износу.

Увеличить же подачу воздуха на забой не всегда представлялось возможным из-за конструктивных особенностей большинства станков, применяемых для бурения взрывных скважин, и, даже когда это удавалось сделать путем подключения дополнительного компрессора, перегрев подшипников все же имел место, поскольку в опоры шарошек воздух не попадал или попадал в весьма ограниченных количествах.

Перечисленные недостатки как конструктивного, так и технологического порядка привели к необходимости совершенствования конструкций штыревых долот, предназначенных для бурения взрывных скважин. Была разработана вторая серия долот — долота типа ОК: 6Н-145-ОК, 5Н-190-ОК, 8Н-214-ОК, 6Н-243-ОК и 2Н-269-ОК, отличающиеся от долот типа К как более мощным вооружением,

так и более совершенной системой подвода воздуха через долото к забою.

В долотах типа ОК подвод воздуха к забою осуществляется через центральное продувочное отверстие круглого сечения. Кроме того, в лапах и их цапфах были выполнены специальные каналы, по которым часть воздуха (20—25% от общего расхода) поступает в опоры шарошек, способствует их охлаждению и предотвращению попадания в них частиц выбуренной породы, т. е. способствует улучшению условий работы опорных подшипников.

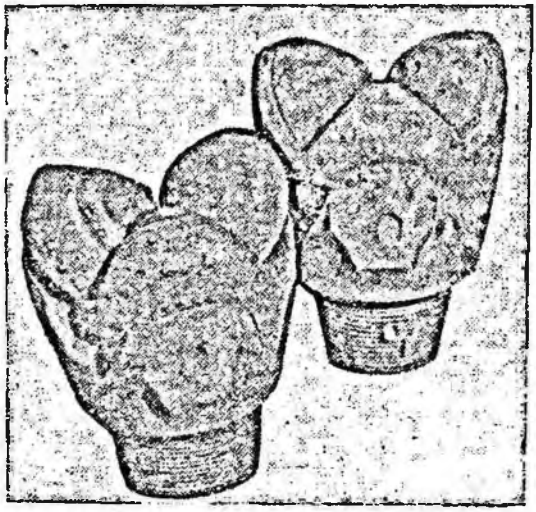


Рис. 27. Характерный износ периферийной части долота, наплавленной зерновым твердым сплавом.

На рис. 28 показана принципиальная схема продувочных устройств долот типа ОК.

Для уменьшения износа долот по диаметру наплавка обратных конусов шарошек зерновым твердым сплавом заменена запрессовкой твердосплавных зубков цилиндрической формы (типа 2СЦ) заподлицо с телом шарошки.

Для большей стойкости периферийной части шарошек зубки в обратные конусы запрессовываются в шахматном порядке по отношению к зубкам периферийных венцов, калибрующих стенку скважины.

Для предотвращения или снижения до минимума скола зубков на рабочих конусах шарошек уменьшены шаг и вылет над телом шарошек, в некоторых случаях предусмотрена запрессовка зубков большего диаметра, что уменьшило непоражаемые участки забоя по радиусу скважины.

На рис. 29 показан общий вид долота 8Н-214-ОК.

В табл. 19 для сравнения приведены параметры вооружения долот типов К и ОК диаметром 214 и 190 *мм*.

Рис. 28. Схема продувочных устройств долот типа ОК.

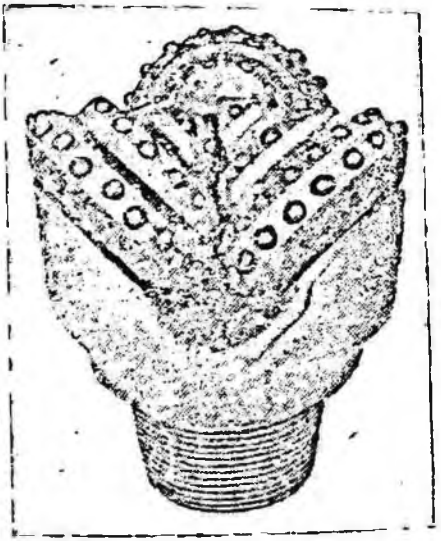


Рис. 29. Долото 8Н-214-ОК, общий вид.

Как видно из табл. 19, усиление вооружения долот типа ОК выполнего в основном за счет увеличения диаметра части зубков, а в долотах диаметром 190 *мм*, кроме того, также и за счет увеличения их общего количества.

Таблица 19

Шифр долота	Диаметр долота, *мм*	Количество зубков, шт.			Среднее расстояние между двумя соседними зубками в одном венце	Воротники, *мм*	
		всего	в том числе диаметром, *мм*			средний	максимальный
			8	10			
6Н-9К	214	135	57	78	11.0	4.0	4.0
8Н-214-ОК	214	134	13	121	10.3	1.5	2.0
4Н-8К	190	100	100	—	16.0	4.0	6.5
5Н-190-ОК	190	124	73	51	10.2	3.2	5.5

Испытанные в стендовых условиях при бурении блоков карельского гранита долота типа ОК дали увеличение проходки на долото в среднем на 40—50% при небольшом увеличении механической скорости бурения — на 8—10%.

Долота типа ОК испытывались в промышленных условиях на карьерах горных предприятий при разных условиях бурения и в различных по крепости породах.

Показатели работы долот типа ОК сравнивались с показателями серийных типов К и ТК.

Во всех случаях опытные долота показали увеличение проходки при одинаковой или несколько большей механической скорости бурения. Стойкость вооружения долот типа ОК оказалась значительно большей, уменьшился скол зубков и их износ.

В табл. 20 приведены сравнительные показатели работы долот типа ОК и серийных — типов К и ТК.

Таблица 20

Предприятие	Шифр долота	Диаметр долота, мм	Опытные или серийные	Коэффициент крепости, f	Средняя проходка на долото, м
Ленногорский комбинат	6Н-145-ОК	145	Опытные	14—16	30,0
	6-6вК	145	Серийные	14—16	22,5
Строительство железной дороги Абакан—Тайшет	6Н-145-ОК	145	Опытные	6	100,0
	6Н-145-ОК	145	»	12—14	35,0
Трест Союзасбест	5Н-190-ОК	190	»	12—15	33,5
	ОМ-575-8Т	190	Серийные	12—15	5,9
	2В-8ТК	190	»	12—15	14,5
Докучаевский комбинат	8Н-214-ОК	214	Опытные	8—12	287
	6Н-9К	214	Серийные	8—12	130
	КО7-9К	214	»	8—12	46
Алтын-Топканский комбинат	8Н-214-ОК	214	Опытные	6—15	181,0
	6Н-9К	214	Серийные	6—15	94,0
Ждановский ГОК	8Н-214-ОК	214	Опытные	12—15	124,0
	63-07-9К	214	Серийные	12—15	36,0
ЮГОК	8Н-214-ОК	214	Опытные	8—12	55,4
	6Н-9К	214	Серийные	8—12	29,6
Алтын-Топканский комбинат	6Н-243-ОК	243	Опытные	10—12	169,0
	АСГ-17-10К	243	Серийные	10—12	108,0
Оленегорский ГОК	6Н-243-ОК	243	Опытные	10—14	100,0
	АСГ-17-10К	243	Серийные	10—14	40,0
Ждановский ГОК	6Н-243-ОК	243	Опытные	12—15	78,0
ЮГОК	2Н-269-ОК	269	»	до 14	94,0
	6Н-243-ОК	243	»	до 14	60,0
	6-10К	243	Серийные	до 14	31,0

Анализ состояния отработанных долот показал, что армировка затылков шарошек твердосплавными зубками себя оправдала.

Износ долот типа ОК по диаметру значительно уменьшился по сравнению с долотами, обратные конусы шарошек которых наплавлены зерновым твердым сплавом.

В табл. 21 приведены средние результаты обмера отработанных долот диаметром 214 *мм*, а также относительный износ их по диаметру (на 1 *м* пробуренной скважины).

Таблица 21

Наименование предприятия	Шифр долота	Количество обмеренных долот	Средняя проходка на долото, *м*	Средневзвешенный абсолютный износ долота по диаметру, *мм*	Средневзвешенный относительный износ долота по диаметру	
					мм/м	% к долоту 6Н-9К
ЮГОК	6Н-9К	6	29	5.55	0.191	100.0
	8Н-214-ОК	18	55	5.55	0.100	52.5
Рудник Кальмакыр	6Н-9К	35	94	4.50	0.048	100.0
	8Н-214-ОК	8	181	3.90	0.022	45.0
Докучаевский флюсодоломитный комбинат	6Н-9К	5	130	2.50	0.019	100.0
	8Н-214-ОК	17	287	1.00	0.004	21.1

Из табл. 21 видно, что укрепление затылков шарошек твердосплавными зубками значительно снизило их относительный износ по диаметру по сравнению с наплавкой зерновым твердым сплавом. Сравнение долот типа ОК других размеров с серийными долотами типа К в отношении износа по диаметру дало аналогичные результаты.

Наличие в лапах и цапфах долот типа ОК каналов для продувки опор в значительной степени сократило случаи их заклинивания от перегрева или зашламления частицами выбуренной породы. Последнее имело место в основном лишь при недостаточной очистке забоя скважины от шлама вследствие малой производительности компрессоров или при бурении обводненных скважин.

Стабильность результатов отработки долот типа ОК позволила снизить стоимость бурения взрывных скважин.

В табл. 24 приведена стоимость 1 *м* скважин при бурении долотами типов К и ОК по затратам только на долота (по сведениям 1962 г., так как впоследствии долота 6Н-9К были сняты с производства и заменены долотами 8Н-214-ОК).

Как видно из табл. 22, стоимость бурения 1 *м* взрывных скважин только по затратам на долота (без учета скорости бурения) меньше при бурении долотами типа ОК почти в 2 раза по сравнению с долотами типа К.

Достаточно высокие результаты промышленных испытаний долот типа ОК позволили рекомендовать их к серийному производству на различных долотных заводах СССР.

Долота 6Н-145-ОК начали изготовляться ремонтно-механической базой Лениногорского полиметаллического комбината, долота

Таблица 22

Наименование предприятия	Шифр долота	Стоимость одного долота, руб.	Средняя проходка на долото, м	Стоимость 1 м скважины по затратам на долота	
				руб/м	в % к долоту 6Н-9К
ЮГОК	6Н-9К	140	29	4.83	100
	8Н-214-ОК	150	55	2.73	56.5
Рудник Кальмакыр	6Н-9К	140	94	1.49	100
	8Н-214-ОК	150	181	0.83	55.7
Докучаевский флюсодоломитный комбинат	6Н-9К	140	130	1.08	100
	8Н-214-ОК	150	287	0.52	48

5Н-190-ОК и 6Н-243-ОК Поваровским опытным заводом, долота 8Н-214-ОК Поваровским и Куйбышевским заводами (на последнем они выпускаются под шифром 1К-214-ОК), долота 2Н-269-ОК Пермским машиностроительным и Поваровским опытным заводами.

Долотными заводами были разработаны и выпускаются штыревые долота, сконструированные с учетом опыта отработки долот типа ОК конструкции ВНИИБТ. Эти долота также нашли широкое применение при бурении взрывных скважин на горных предприятиях, особенно при бурении средних по крепости, не очень абразивных пород типа крепких известняков, доломитов, апатитовых и фосфоритовых руд и т. д.

Однако в очень крепких, сильно абразивных породах типа железистых кварцитов, гранодиоритов и других они значительно уступали по стойкости и механической скорости бурения долотам типа ОК конструкции ВНИИБТ.

Усовершенствования, введенные в долотах типа ОК по сравнению с долотами типа К, в значительной степени увеличили их стойкость.

В особенности возросла стойкость опоры в результате введения дополнительных каналов в лапах для подачи в опоры воздуха. Стойкость опоры долот при бурении взрывных скважин на большинстве предприятий горнорудной промышленности была вполне достаточной и соответствовала стойкости вооружения. А при бурении в особо крепких, сильно абразивных породах она стала превосходить стойкость вооружения.

Это особенно было заметно, когда бурение велось с достаточным для очистки забоя количеством воздуха, т. е. когда долото работало по чистому забою и полностью исключалась возможность зашламления опор шарошек.

При разбуривании сильно абразивных пород лимитирующим фактором в стойкости долота, как правило, становится вооружение.

Дальнейшие поиски в усовершенствовании долот типа ОК проводились в направлении усиления вооружения.

В результате анализа состояния большого количества отработанных долот было замечено, что во многих случаях долота выходят из строя вследствие износа вершины первой шарошки.

Дело в том, что конструктивные особенности долот с шарошками самоочищающегося типа (все долота ОК относятся к этому типу), не позволяют создать достаточно работоспособное вооружение, разбуривающее центральную зону забоя.

В данном случае может быть вооружена зубками вершина только одной из шарошек, к тому же количество запрессованных зубков в ней не превышает 3—5 шт.

Увеличение этого количества зубков на вершине одной шарошки приведет к уменьшению толщины стенки между ними и как следствие к образованию трещин в металле при запрессовке зубков и выпадению последних в процессе бурения.

Износ вершины первой шарошки приводит к образованию на забое, так называемой «сахарной головки», которая в дальнейшем ведет к интенсивному износу усеченных вершин остальных шарошек, иногда вплоть до обнажения опорных подшипников.

На отдельных предприятиях количество долот, вышедших из строя из-за износа вершины первой шарошки, достигало 30% и более (ЮГОК, Оленегорский ГОК, Запорожское карьероуправление и др.).

Изготовление же долот несамоочищающегося типа, в которых можно было бы вооружить вершины всех шарошек, приводит к значительному уменьшению опорных подшипников и, следовательно, к их ослаблению, что явно нецелесообразно.

В связи с этим во ВНИИБТ в 1963 г. была разработана конструкция долота 8Н-214-ОК (II вариант), вооружение шарошек которого на венцах основных конусов оставлено самоочищающегося типа, а вершины шарошек несколько срезаны по образующим конуса таким образом, что все их можно вооружить твердосплавными зубками и все они участвуют в разрушении центральной зоны забоя, не цепляясь между собой (рис. 30). Общее количество зубков, разбуривающих центральную зону забоя скважины, увеличено в 2,5 раза (10 против 4). Опора в долотах 8Н-214-ОК II вариант оставлена без изменения относительно долот основного варианта.

Указанные долота были испытаны на карьерах Запорожского карьероуправления и Оленегорского горнообогатительного комбината. На карьере Запорожского карьероуправления бурение велось станками БСШ-1М в гранитах с коэффициентом крепости 10—14 по шкале проф. М. М. Протодьяконова при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, T	11—13
Скорость вращения долота, *об/мин*	120—150
Расход воздуха, $м^3/мин$	8—10

Условия бурения в значительной степени осложнялись сильной обводненностью скважин, что приводило к образованию на забое

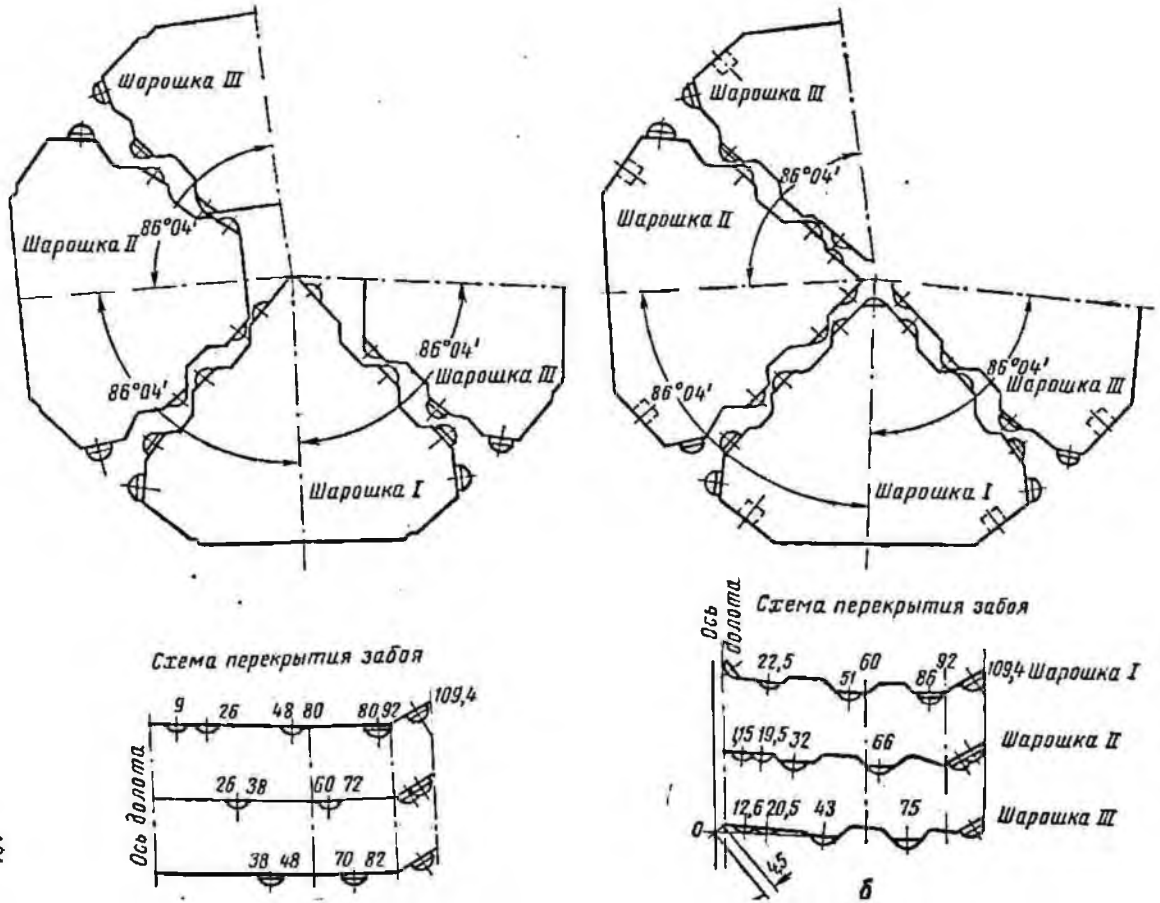


Рис. 30. Развертка шарошек и схема перекрытия забоя долотами.

а — долото 8П-214-ОК; б — долото 8Н-214-ОК II вариант.

тестообразной пульпы, способствующей зашламлению опоры и преждевременному выходу долот из строя.

На Оленегорском ГОК долота испытывались при бурении взрывных скважин глубиной 15—18 *м* станками П-25 в породах, представленных в основном железистыми кварцитами магнетитового состава, трещиноватыми, средней и мелкозернистой структуры с содержанием кварцита до 50% с коэффициентом крепости $f = 12 \div 14$. Бурение производилось при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *Т*	до 15
Скорость вращения долота, *об/мин*	150
Расход воздуха, *м³/мин*	9—18

Данные испытаний представлены в табл. 23.

Таблица 23

Предприятие	Шифр долота	Количество отработанных долот	Пробурено, *м*	Средняя проходка на долото, *м*	Средняя механическая скорость бурения, *м/ч*
Запорожское карьероуправление	8Н-214-ОК	5	326	65,2	3,5—5
	8Н-214-ОК (II вариант)	12	1155	96,2	3,5—5
Оленегорский ГОК	8Н-214-ОК	22	1191	54,2	10—15
	8Н-214-ОК (II вариант)	8	612	76,5	10—15

Как видно из табл. 23, средняя проходка на долота 8Н-214-ОК (II вариант) увеличилась по сравнению с долотами 8Н-214-ОК основного варианта в одном случае на 47%, во втором на 41%.

Учитывая, что других изменений в модернизированных долотах не производилось, увеличение проходки на долота следует отнести исключительно за счет усиления вооруженности вершин шарошек.

В дальнейшем при испытании повторных партий этих долот, а также долот других размеров это полностью подтвердилось. Долота с вооруженными зубками вершинами у всех трех шарошек при бурении в крепких абразивных породах, давали стабильное увеличение проходки по сравнению с долотами, имеющими одну вершину, на 30—40%.

Осмотр отработанных долот показал, что выход из строя долот 8Н-214-ОК (II вариант) из-за износа вершин шарошек не наблюдался. Износ вооружения всех венцов был более равномерным, чем у долот 8Н-214-ОК основного варианта. Механическая скорость бурения теми и другими долотами осталась на одном уровне.

На рис. 31 показан характерный износ вооружения штыревых долот 8Н-214-ОК и 8Н-214-ОК (II вариант).

На основании проведенных исследований было принято решение рекомендовать долота всех размеров, предназначенные для бурения

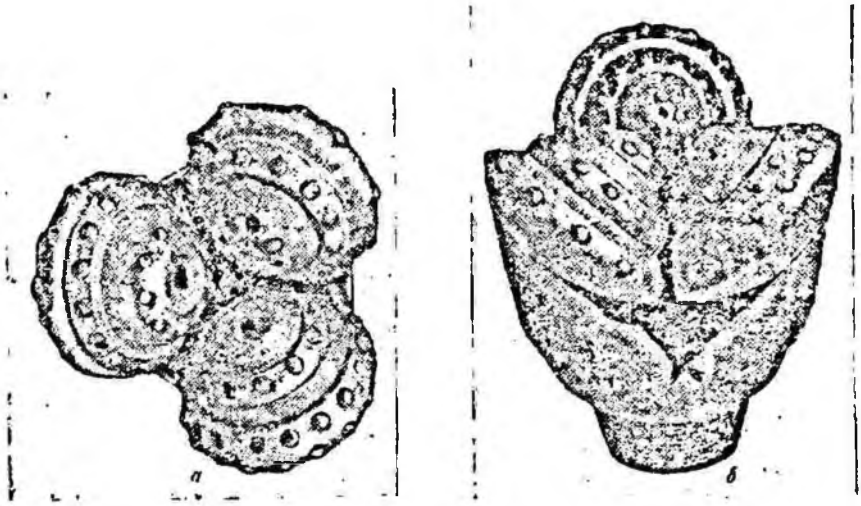


Рис. 31. Характерный износ вооружения долот.
а — долото 8Н-214-ОК; *б* — долото 8Н-214-ОК II вариант.

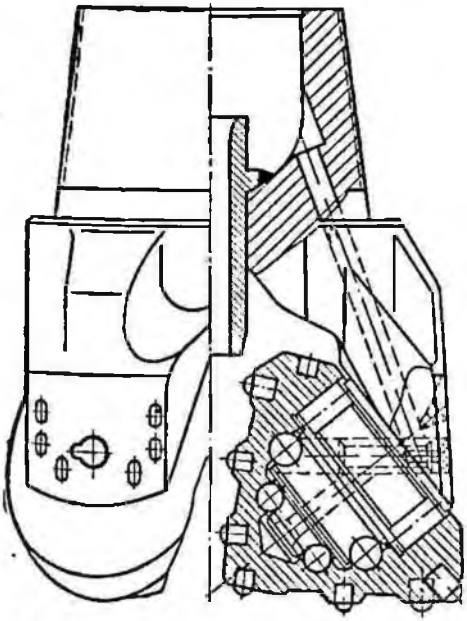


Рис. 32. Долото 7Н-190-ОКП в разрезе.

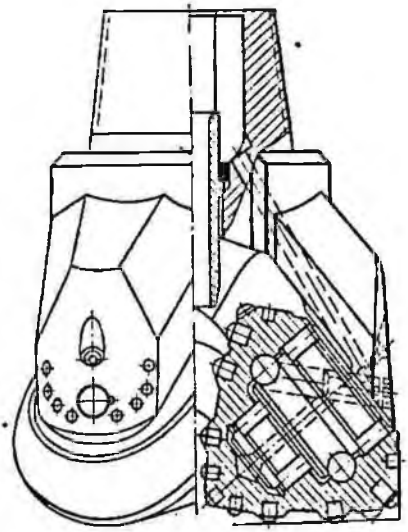


Рис. 33. Долото 243-ОКП-000-3 в разрезе.

в особо крепких, сильно абразивных породах, изготовлять вооруженными твердосплавными зубками с вершинами у всех трех шарошек.

Во ВНИИБТ были разработаны конструкции таких долот: Н-145-ОК на базе долота 6П-145-ОК, 7Н-190-ОКП (рис. 32) — на базе долота 5Н-190-ОК; 243-ОКП-000-3 (рис. 33) — на базе долота 6Н-243-ОК. Кроме того, аналогичной конструкции были созданы долота диаметрами 295 *мм* (295-ОКП) и 320 *мм* (320-ОКП).

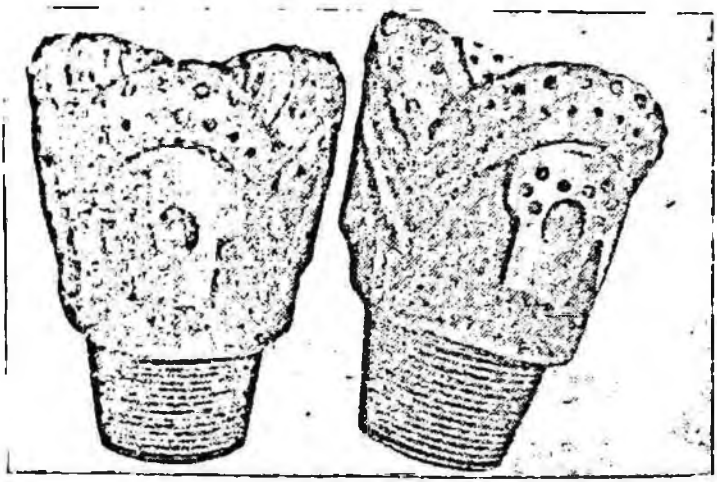


Рис. 34. Абразивный износ спинок лап армированных и неармированных твердосплавными зубками.

При бурении в абразивных породах значительному износу подвергаются не только рабочие поверхности и обратные конусы шарошек, но также козырьки и спинки лап, иногда вплоть до обнажения и высыпания тел качения опорных подшипников.

Для ликвидации или во всяком случае сведения до минимума этого явления в новых конструкциях долот предусмотрено армирование спинок лап твердосплавными зубками цилиндрической формы, запрессованными заподлицо с телом.

Практика отработки этих долот подтвердила целесообразность такой армировки. Износ корпуса долота по диаметру значительно уменьшился, случаи выхода из строя долот из-за обнажения тел качения стали редкие, а на отдельных рудниках прекратились совершенно.

На рис. 34 показан абразивный износ спинок лап, армированных и не армированных твердосплавными зубками.

Долота 7Н-190-ОКП и 243-ОКП-000-3 были испытаны в стендовых и промышленных условиях с положительными результатами.

Долота 7Н-190-ОКП испытывались при бурении взрывных скважин глубиной 13—15 *м* станками БСШ-1М и БСШ-2М при следующих параметрах режима.

Осевая нагрузка на долото, *Т*	13—15
Скорость вращения долота, *об/мин*	90—130
Расход воздуха, *м³/мин*	8

Для снижения пылеобразования в процессе бурения в скважину добавлялось небольшое количество воды.

Долота 243-ОКП-000-3 испытывались при бурении скважин глубиной 18—20 *м* станками П-25 и СБШ-250 при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *Т*	20—24
Скорость вращения долота, *об/мин*	62—83
Расход воздуха, *м³/мин*	9—18
Расход воды для пылеподавления, *л/мин*	4—5

Результаты отработки долот в сравнении с ранее выпускаемыми серийными долотами представлены в табл. 24.

Таблица 24

Предприятие	Шифр долота	Количество отработанных долот	Коэффициент крепости	Средняя проходка на долото, *м*
Запорожское карьероуправление	7Н-190-ОКП	8	12—14	167.5
	5Н-190-ОК	7	12—14	109.7
Гиванский карьер Западукрвзрывпрома	7Н-190-ОКП	30	10—14	117.0
	5Н-190-ОК	8	10—14	84.0
	8В-190-КП	11	10—14	105.0
Аксайский рудник комбината «Кара-Тау»	7Н-190-ОКП	4	6—8	713.0
	5Н-190-ОК	7	6—8	370.0
	7Н-190-ОКП	6	8—10	444.0
	5Н-190-ОК	8	8—10	241.0
	7Н-190-ОКП	35	8—12	305.0
	5Н-190-ОК	210	8—12	185.0
	7Н-190-ОКП	8	10—12	364.0
	5Н-190-ОК	10	10—12	217.0
Кальмакырский и Кургашиканский рудники Алтын-Топканского комбината	7Н-190-ОКП	5	14—16	113.4
	5Н-190-ОК	10	14—16	74.1
	8В-190 КП	5	14—16	68.6
	7Н-190-ОКП	22	10—12	356.5
	5Н-190-ОК	15	10—12	181.0
	8В-190-КП	44	10—12	116.0
	7Н-190-ОКП	3	6—8	954.0
	8В-190-КП	4	6—8	663.75
Оленегорский горнообогатительный комбинат	243-ОКП	16	10—12	171.0
	6Н-243-ОК	49	10—12	105.5
	243-ОКП	47	12—14	113.3
	6Н-243-ОК	23	12—14	72.0
	243-ОКП	32	12—16	67.0
	6Н-243-ОК	16	12—16	42.0

Как видно из табл. 24 опытные долота, имеющие вооруженные твердосплавными зубками вершины всех трех шарошек и армированные спинки лап, дали значительное увеличение проходки по сравнению с долотами серийных конструкций. Возросла также и стойкость долот в часах. Если долота 5Н-190-ОК, 8В-190-КП и 6Н-243-ОК часто выходили из строя из-за износа вершины первой шарошки, а при бурении в сильно абразивных породах также из-за износа корпуса долота, то новые долота в большинстве случаев имели более равномерный износ вооружения и опорных элементов и выходили из строя вследствие естественного износа долота.

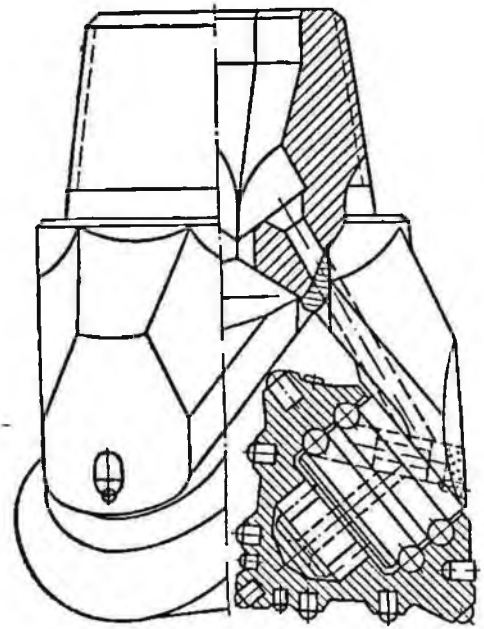


Рис. 35. Долото 8В-190-ОКП в разрезе.

После успешного проведения широких промышленных испытаний чертежи долот типа ОКП были переданы машиностроительным заводам для их серийного изготовления. Промышленные партии этих долот продолжает выпускать Поваровский опытный завод.

В ближайшие годы долота типа ОКП, очевидно, найдут широкое применение и явятся основным типом породоразрушающего инструмента при бурении взрывных скважин в особо крепких абразивных породах.

В 1966—1967 гг. долота типа ОКП диаметрами 295 и 320 *мм* проходят стендовые и промышленные испытания.

Наряду с перечисленными конструкциями долот долотные заводы продолжают изготовлять штыревые долота типов К и ОК, нашедших более или менее широкое применение в горной промышленности.

Ниже приводятся некоторые последние конструкции этих долот, разработанные конструкторскими бюро долотных заводов совместно с ВНИИБТ или самостоятельно, однако с учетом конструктивных особенностей долот ОК и ОКП, разработанных ВНИИБТ.

Долото 8В-190-ОКП (рис. 35) изготовляется Верхне-Сергинским долотным заводом, предназначено для бурения как нефтегазовых, так и взрывных скважин в горной промышленности. В последнем случае долота изготовляются с продувочными каналами в лапах и их цапфах.

Характерным отличительным признаком данного долота является опора, выполненная с двумя шариковыми замками (диаметр шаров 11,113 *мм*) и концевым роликовым подшипником (ролики диаметром 8 × 16 *мм*).

Вооружение шарошек штыревое с диаметрами зубков 6, 8 и 10 *мм* с постепенным увеличением их диаметра от вершины шарошек к периферийным венцам.

Центральная часть забоя скважины разбуривается остроконечными вершинами всех трех шарошек (угол при вершине шарошек составляет 84° 30′).

Обратные конусы шарошек армированы твердосплавными зубками цилиндрической формы диаметром 8 *мм*.

Долото **ОМ-190-ОКП** (рис. 36) изготовляется Пермским машиностроительным заводом и предназначено для бурения в очень крепких абразивных породах.

Долото имеет каналы в лапах для продувки опор сжатым воздухом.

Характерным признаком, отличающим долото ОМ-190-ОКП от других серийных долот, является пятирядная опора, выполненная по схеме: подшипник скольжения — шариковый замок — ролик — шарик — опора скольжения. Наряду с положительными качествами (повышенная грузоподъемность) эта опора в условиях бурения взрывных скважин имеет существенные недостатки: небольшой кольцевой зазор в подшипниках скольжения (десятые доли миллиметра) создает значительные препятствия при движении воздуха через каналы в лапах и опорные подшипники, что приводит к перегреву последних и усугубляет возможность их зашламления, в результате чего опоры шарошек подвержены заклиниванию. Это приводит к преждевременному выходу долота из строя.

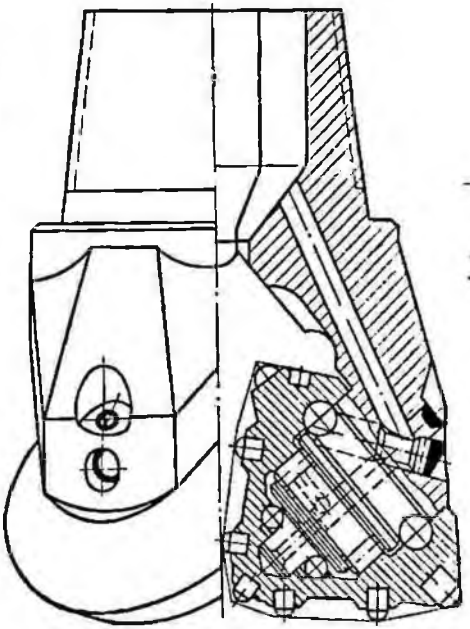


Рис. 36. Долото ОМ-190-ОКП в разрезе.

Кроме того, выполнение большей по объему опоры привело к уменьшению толщины стенок шарошек и к снижению их прочности.

Так, при бурении в Кара-Тау в породах с коэффициентом крепости 10—14 по классификации проф. М. М. Протодьяконова, имели

место случаи поломки вершин всех трех шарошек и выхода из строя долот при работоспособном вооружении остальных венцов.

Долото ОМ-190-ОКП имеет достаточно стойкое вооружение: твердосплавные зубки диаметром 12 *мм* на периферийных венцах, диаметром 10 *мм* на промежуточных и диаметром 8 *мм* на вершинах всех трех шарошек.

Для уменьшения скола зубков вылет их над телом шарошки на всех венцах уменьшен до величины сферы. Обратные конусы шарошек армированы также твердосплавными зубками.

В табл. 25 приведены показатели работы долот ОМ-190-ОКП в сравнении с показателями работы серийных долот 8В-190-КП.

Таблица 25

Предприятие	Шифр долота	Количество отработанных долот	Коэффициент крепости	Средняя проходка на долото, м	Средняя механическая скорость бурения, м/ч
Рудник Кальмакыр Алтын-Топканского комбината	ОМ-190-ОКП	4	8	460	18.0
	8В-190-КП	7	8	418	18.0
	ОМ-190-ОКП	18	8—10	302	15.0
	8В-190-КП	33	8—10	255	15.0
	ОМ-190-ОКП	8	12—14	143	10.0
	8В-190-КП	5	12—14	103	10.0
Южный и Центральный рудники комбината Ураласбест	ОМ-190-ОКП	19	12	225.7	9.06
	8Н-190-КП	20	12	174.4	7.25
	ОМ-190-ОКП	8	14	129.2	5.73
	8В-190-КП	7	14	104.4	4.78
	ОМ-190-ОКП	22	16—18	59.22	3.41
	8В-190-КП	20	16—18	50.52	3.05

Результаты отработки долот ОМ-190-ОКП, приведенные в табл. 25, свидетельствуют о некоторых преимуществах этих долот по сравнению с серийными долотами 8В-190-КП.

Для улучшения эффективности работы долот ОМ-190-ОКП опоры их следовало бы откорректировать применительно к условиям бурения взрывных скважин в горной промышленности.

Долото 56К-190-ОКП разработано Куйбышевским долотным заводом и предназначено для бурения в крепких и особо крепких породах с продувкой забоя воздухом.

Опора шарошек состоит из двойного шарикового замка (шары диаметром 11,113 *мм*) и концевого роликового подшипника (роликами 8 × 16 *мм*). В лапах имеются продувочные каналы для подачи в опоры воздуха.

Вооружение выполнено в виде твердосплавных зубков типа 1СЦ с величиной вылета на периферийных венцах 4,2 *мм* и на остальных 3 *мм*.

Первая опытная партия долот 56К-190-ОКП испытывалась в 1966 г.

Долото 1К-214-ОКП серийно изготовляется Куйбышевским долотным заводом. Разработано оно по чертежам долота 8Н-214-ОК. Опора и вооружение долота оставлены без изменения.

Долото нашло широкое промышленное применение на ряде горных предприятий, сложенных твердыми и крепкими абразивными породами.

В 1965 г. Куйбышевским заводом выпущено более 8000 шт. этих долот, которые были отработаны на карьерах комбината Апатит, Криворожских и Гайского ГОК, Запорожского карьероуправления и других предприятий.

На всех предприятиях долота 1К-214-ОКП дали значительное увеличение проходки по сравнению с долотами К-214-ОК, применявшимися до этого на указанных предприятиях.

Основным слабым местом долота 1К-214-ОКП является увеличенный вылет зубков на периферийных венцах (5,5 *мм* при диаметре зубков 10 *мм*), что при бурении в крепких породах способствует их массовому сколу.

При корректировке чертежей вылет зубков следует несколько уменьшить или же увеличить их диаметр до 12 *мм*.

К недостаткам этого долота относится также то, что оно выполнено с вершиной только одной шарошки, это часто приводит к образованию на забое «сахарной головки» вследствие преждевременного износа вершины первой шарошки при работоспособном состоянии остального вооружения.

Долото 114К-214-ОКП, также Куйбышевского завода, предназначено для бурения с продувкой воздухом в очень крепких абразивных породах.

Опора долота выполнена с двойными шариковыми замками (шары диаметром 12,7 *мм*) и концевым роликовым подшипником (ролики 8 × 16 *мм*).

Для улучшения продувки опор воздухом в лапах долота просверлены каналы увеличенных диаметров. Увеличены также зазоры между буртами в опорах с 1—1,5 до 3 *мм*.

Вооружение долота 114К-214-ОКП такое же, как и у долота 11Н-214-ОК конструкции ВНИИБТ, т. е. вершины всех трех шарошек вооружены зубками и шарошки позволяют осуществить полное перекрытие забоя скважины по радиусу. Диаметр зубков на вершинах 8 *мм*, на остальных венцах 10 *мм*. Уменьшен по сравнению с долотом 1К-214-ОКП вылет зубков над телом шарошек до 4,2 *мм* на периферийных венцах и 2,4—2,9 *мм* на венцах основного конуса. Обратные конуса шарошек армированы зубками 2СЦ диаметром 8 *мм*.

Первая опытная партия этих долот была изготовлена заводом в конце 1965 г. Испытания их на стенде при бурении гранитных блоков дали положительные результаты.

Долото У-243К-000-1 изготовляется Дрогобычским долотным заводом, предназначено для бурения нефтегазовых и взрывных скважин.

Долото разработано совместно ВНИИБТ и Дрогобычским долотным заводом на основе долот 6Н-243-ОК конструкции ВНИИБТ.

Схема опоры осталась та же, лишь концевой подшипник уменьшен на один ролик, что дало возможность несколько увеличить толщину стенки шарошки в опасном сечении.

Усилено вооружение долота путем запрессовки на периферийных венцах зубков диаметром 12 *мм* вместо 10 *мм*, как у долот 6Н-243-ОК, что способствовало уменьшению их скалывания. Однако выполнение долота с вершиной только у одной шарошки безусловно снижает их стойкость при бурении в крепких абразивных породах.

Долото АСГ-17-10К используется на ряде предприятий горной промышленности при бурении взрывных скважин в крепких породах.

Опора долота аналогична опоре 6Н-243-ОК, однако выполнена без продувочных каналов в лапах.

Вооружение представлено зубками диаметром 8 и 10 *мм*, запрессованными с небольшим вылетом над телом шарошки — на величину сферы на венцах основных конусов шарошек и немного более на периферийных венцах. У этого долота на 30—40% увеличен шаг зубков по сравнению с долотом 6Н-243-ОК. Тыльная часть шарошек армирована зерновым твердым сплавом.

Отсутствие продувочных каналов в лапах, увеличенный шаг зубков и применяемое армирование тыльной части шарошек отрицательно сказываются на показателях работы долот АСГ17-10К при бурении взрывных скважин в крепких абразивных породах.

Небольшой вылет зубков над телом шарошек делает нерациональным их применение в породах средней крепости, так как при этом значительно снижается механическая скорость бурения. Поэтому при бурении взрывных скважин долота АСГ17-10К могут иметь лишь весьма ограниченное применение.

Долото ОМ-29-11-ОК изготовляется Пермским машиностроительным заводом им. В. И. Ленина для бурения нефтегазовых и взрывных скважин. В последнем случае оно выполняется с продувочными каналами в лапах. Опора долота выполнена по серийной схеме: роликовый подшипник (ролики диаметром 10 × 20 *мм*), шариковый замок (шарик диаметром 19,05 *мм*) и малый роликовый подшипник (ролики диаметром 10 × 20 *мм*).

Шарошки трехконусные, самоочищающегося типа с вооружением вершины только у одной из шарошек.

Вооружение шарошек представлено зубками: на вершине зубки диаметром 10 *мм* с вылетом под телом шарошки 5 *мм*, на венцах основного конуса и периферийных зубки диаметром 12 *мм* с вылетом соответственно 6,5 и 8 *мм*.

Обратные конусы шарошек армированы наплавкой зерновым твердым сплавом. Шаг зубков по телу шарошек на периферийных венцах 23—26 *мм*, на остальных венцах 22—24 *мм*.

Лучшие показатели это долото дает при разбуривании твердых и крепких несцементированных или слабо сцементированных пород. При бурении в очень крепких сцементированных породах наблюдается значительный скол зубков вследствие большого их вылета

над телом шарошки. Значительная часть долот выходит также из строя из-за износа или слома вершины первой шарошки.

С учетом указанных выше факторов Пермским машиностроительным заводом им. В. И. Ленина совместно с ВНИИБТ была разработана конструкция долота ОМ-269-ОКП (рис. 37) специально для бурения взрывных скважин в крепких и особо крепких абразивных породах. Опора долота целиком заимствована из проекта ОМ-29-11-ОК, а вооружение переработано. Увеличен диаметр зубков и уменьшен их вылет над телом шарошки. На периферийных венцах запрессованы зубки диаметром 14 *мм* с вылетом над телом шарошки 6 *мм* на средних венцах — зубки диаметром 12 *мм* с вылетом 5 *мм*, а на вершинах всех трех шарошек — зубки диаметром 10 *мм* с вылетом 3,5 *мм*.

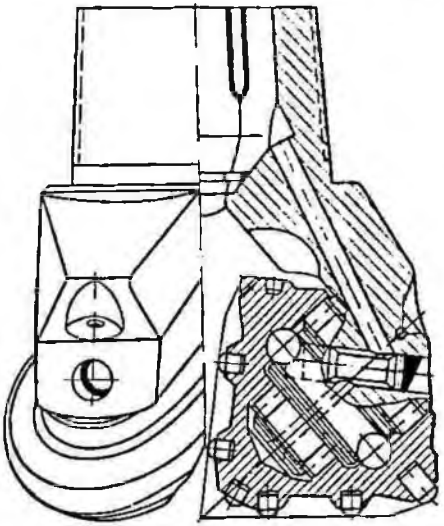


Рис. 37. Долото ОМ-269-ОКП в разрезе.

В табл. 26 приведены показатели работы опытных долот ОМ-269-ОКП в сравнении с показателями работы серийных долот ОМ-29-11-ОК на карьерах Ждановского и Оленегорского горнообогатительных комбинатов.

Таблица 26

Предприятие	Шифр долота	Количество отработанных долот	Коэффициент крепости	Средняя проходка на долото, *м*	Средняя механическая скорость бурения, *м/ч*
Оленегорский ГОК	ОМ-269-ОКП	2	10—14	207.0	16.0
	ОМ-29-11-ОК	2	10—14	144.5	13.0
	ОМ-269-ОКП	9	12—16	52.8	9—10
	ОМ-29-11-ОК	8	12—16	30.5	11—12
Ждановский ГОК	ОМ-269-ОКП	2	9—14	486.0	18.8
	ОМ-29-11-ОК	3	9—14	383.0	20.9
	ОМ-269-ОКП	7	12—16	233.0	14.5
	ОМ-29-11-ОК	6	12—16	156.0	14.9
	ОМ-269-ОКП	6	14—16	149.0	14.4
	ОМ-29-11-ОК	6	14—16	100.0	15.0

По сравнению с долотами ОМ-29-11-ОК долота ОМ-269-ОКП дали увеличение проходки при бурении в крепких породах на 35—50% и в менее крепких на 25%. Аналогичные результаты получены

и на карьере Норильского ГМК. При этом в первом случае механическая скорость бурения была на одном уровне, а во втором случае она упала на 10%, что объясняется уменьшением вылета зубков и уменьшением величины их внедрения в породу. В крепких породах это не сказывается, поскольку внедрение зубков в породу в этом случае незначительно. При бурении крепких пород основное значение имеет прочность зубков и сопротивление их скалыванию при воздействии на них динамических нагрузок.

Долота с полным перекрытием забоя скважины

Для проверки влияния дальнейшего усиления вооружения штыревых долот ВНИИБТ были разработаны долота 11Н-214-ОК (рис. 38) и 12Н-214-ОК, обеспечивающие полное перекрытие забоя скважины по радиусу. Эти долота несамоочищающегося типа, причем полное перекрытие забоя скважины было достигнуто здесь за счет уменьшения опорных подшипников. В табл. 27 приведены параметры опорных элементов указанных долот в сравнении с серийным долотом 8Н-214-ОК.

Таблица 27

Шифр долота	Малая роликовая опора			Шариковая опора			Большая роликовая опора		
	диаметр	размер роликов, мм	количество роликов	диаметр цапфы, мм	диаметр шаров, мм	количество шаров	диаметр цапфы, мм	размер роликов, мм	количество роликов
8Н-214-ОК	25.6	8×16	13	49.0	12.7	15	51.1	10×20	19
11Н-214-ОК	23.1	8×16	12	45.0	12.7	14	47.9	10×20	18
12Н-214-ОК	23.1	8×14	12	40.9	12.7	13	44.7	10×20	17

Шарошки долота 11Н-214-ОК выполнены с углом при вершине 86°. Угол забоя, как и в долотах 8Н-214-ОК, составляет 5°, а периферийные венцы калибруют стенку скважины в точке, лежащей выше точки пересечения оси шарошки с осью долота, т. е. проскальзывание калибрующих зубков по породе сведено к минимуму.

Венцы основных конусов шарошек работают с небольшим скольжением, однако меньшим, чем у долот 8Н-214-ОК. Вершины всех трех шарошек вооружены твердосплавными зубками диаметром 8 *мм*, а промежуточные венцы и периферийные зубками диаметром 10 *мм*.

Шаг зубков по телу шарошки на всех венцах не превышает двух диаметров зубков.

Отличительным признаком долота 12Н-214-ОК является то, что вооружение шарошек выполнено по принципу чистого качения, т. е. шарошки перекрываются по забою скважины без скольжения.

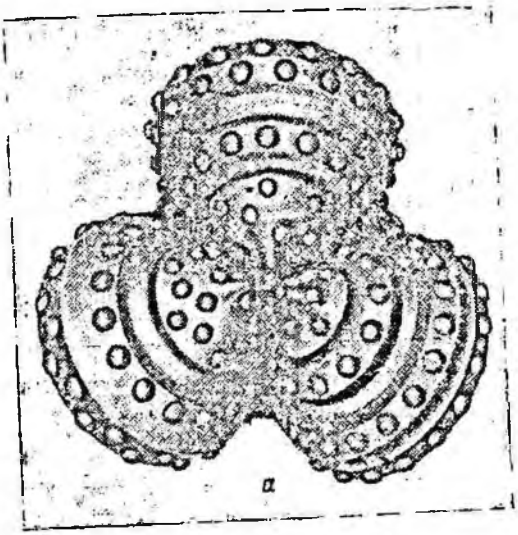
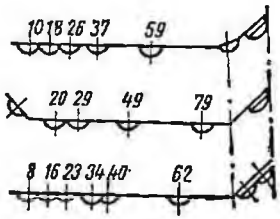


Рис. 38. Долото 11Н-214-ОК.

а — общий вид; б — развертка шарошек и схема перекрытия забоя

Схема перекрытия забоя



В этом случае образующая, проходящая через вершины зубков, пересекает ось долота в точке ее пересечения с осью шарошки. В остальном вооружение выполнено по тому же принципу, что и в долоте 11Н-214-ОК. Схема распределения зубков на поверхности шарошек, обеспечивающая работу долота по принципу чистого качения, привела к необходимости значительного ослабления опорных подшипников даже по сравнению с долотом 11Н-214-ОК (см. табл. 27).

В табл. 28 приведены основные параметры вооружения указанных трех вариантов конструкции долота диаметром 214 *мм*.

Таблица 28

Шифр долота	Количество зубков			Среднее расстояние между двумя соседними зубками в одном венце, *мм*	Среднее расстояние между двумя соседними венцами (воротники), *мм*
	всего	в том числе диаметром			
		8 *мм*	10 *мм*		
8Н-214-ОК	134	13	121	10.3	1.5
11Н-214-ОК	181	39	142	9.2	0
12Н-214-ОК	104	39	125	9.3	0

Уменьшение общего количества запрессованных в шарошки долота 12Н-214-ОК зубков по сравнению с долотом 11Н-214-ОК объясняется уменьшением общих габаритов шарошек вследствие создания условий работы долота по принципу чистого качения. Угол при вершине шарошек уменьшен до 82° против 86° в долотах 11Н-214-ОК и 8Н-214-ОК, а угол забоя составляет всего 3°.

Указанные три варианта долота были испытаны на карьере Запорожского карьероуправления при бурении вертикальных скважин станком БСШ-1М в гранитах с коэффициентом крепости 10-14 по шкале проф. М. М. Протодьяконова при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *Т* . . . . . 12—15
Скорость вращения долота, *об/мин* . . . . . 100—120
Производительность компрессоров, *м³/мин* . . . . . 8—10

Данные сравнительных испытаний этих долот представлены в табл. 29.

Таблица 29

Шифр долота	Количество отработанных долот	Пробурено, *м*	Средняя проходка на долото, *м*	Средняя механическая скорость бурения, *м/ч*
8Н-214-ОК	5	326	65.2	3.5—5
11Н-214-ОК	15	1637	109.1	3.5—5
12Н-214-ОК	5	377	75.4	3.5—5

Осмотр отработанных долот показал, что долота 8Н-14-ОК вышли из строя в основном из-за износа вооружения вершины первой шарошки, а долота 11Н-214-ОК из-за абразивного износа тыльной части шарошек и спинок лап, в некоторых случаях до обнажения и выпадения тел качения.

Зубки на остальных венцах также имели значительный износ, однако были еще в работоспособном состоянии. Из пяти долот 12Н-214-ОК у трех оказались заклинены шарошки в результате значительного износа опорных элементов.

Это свидетельствует о том, что некоторое ослабление опор (долота 11Н-214-ОК) для усиления вооружения при бурении в крепких абразивных породах может дать положительный эффект.

Дальнейшее же уменьшение опорных элементов, проведенное в долотах 12Н-214-ОК, вплоть до замены роликов на малой опоре с 8 × 16 на 8 × 14 *мм* уже нецелесообразно. При длительной работе (20—25 ч) долота начинают выходить из строя из-за заклинивания опор. Улучшение условий работы шарошек, перекатывающихся по забою по принципу чистого качения, не компенсирует значительного ослабления опорных подшипников.

В дальнейшем с улучшением технологии бурения и при некоторой модернизации долот (были запрессованы твердосплавные зубки в стенки лап, а долота 8Н-214-ОК стали изготовлять с вооруженными зубками вершинами всех трех шарошек) средняя проходка на долото на Запорожском карьероуправлении поднялась до 196 *м* на долото 11Н-214-ОК и 113 *м* на долото 8Н-214-ОК (II вариант) при небольшом увеличении механической скорости бурения.

Использование долот с таким мощным вооружением, как у 11Н-214-ОК, будет эффективным и экономически целесообразным лишь при бурении крепких абразивных пород (перидотитов, кварцитов, габбро, крепких гранитов и т. д.).

Применение долот 11Н-214-ОК в менее крепких породах — на рудниках комбинатов «Кара-Тау» и Докучаевского — не дало существенных преимуществ по сравнению с долотами 8Н-214-ОК.

В результате уменьшенного вылета зубков над телом шарошек механическая скорость бурения этими долотами была меньше, чем долотами 8Н-214-ОК, а поскольку стойкость долот в этих условиях часто лимитируется стойкостью опор, то и проходка на долота была несколько меньшей.

Таким образом, анализ отработки большого количества долот, вооруженных твердосплавными зубками с полусферической формой рабочей поверхности, показал, что для бурения взрывных скважин в горной промышленности целесообразно иметь такие долота по меньшей мере с двумя вариантами вооружения.

Для бурения самых крепких, сильно абразивных пород (железистые кварциты, перидотиты, габбро, граниты, граносиениты и т. д.) следует применять долота с наиболее мощным вооружением, стойким к абразивному износу и большим ударным нагрузкам.

Вооружение этих долот должно характеризоваться следующими основными параметрами.

1. Твердосплавные зубки должны быть по возможности большего диаметра с постепенным его увеличением от вершины к периферии шарошек.

В табл. 30 приведены рекомендуемые диаметры зубков для долот различных диаметров. Эти рекомендации разработаны на основе анализа большого количества отработанных опытных и серийных долот.

Таблица 30

Диаметр долота, мм	Диаметр твердосплавных зубков, мм			
	на вершинах шарошек	на средних венцах	на периферийных венцах	на затылках шарошек и спинках лап
145	6—8	8	8—10	6—8
190	8	8—10	10	8
214	8—10	10—12	12	8—10
243	10	12	12—14	10
269	10—12	12—14	14	10—12

В табл. 30 не вошли долота диаметром 295 и 320 *мм* ввиду ограниченного количества данных по этим долотам, так как в промышленных условиях были испытаны всего две конструкции этих долот общим количеством 20—30 шт.

2. Вылет зубков должен быть небольшим, не превышающим величины сферы зубков на вершинах шарошек и средних венцах, и чуть бо́льшим на периферийных венцах (на 0,5—1 *мм* превышающим величину сферы зубков).

3. Расстояние между центрами двух соседних зубков на одном венце (шаг зубков) следует выдерживать в пределах 2—2,2 диаметра зубка.

4. Перекрытие забоя скважины по радиусу должно быть или полным, или с небольшими воротниками, исключающими возможность образования на забое гребешков, которые в силу абразивности породы часто приводят к значительному износу тела шарошки.

5. Для предохранения долота от износа по диаметру обратные конусы шарошек и спинки лап необходимо армировать запрессованными твердосплавными зубками.

6. Геометрические формы шарошек должны обеспечивать минимальное скольжение зубков по забою, максимально приближая условия их работы к условиям чистого качения.

7. Долота должны быть с вооруженными зубками вершинами всех трех шарошек, т. е. каждая из шарошек должна участвовать в разбуривании центральной зоны забоя.

Указанным требованиям в большей степени, чем другие долота, соответствуют следующие конструкции долот: Н-145-ОК-000-1,

7Н-190-ОКП, 8В-190К, ОМ-190-ОКП, 11Н-214-ОК, II-243-ОКП-000-3 и ОМ-269-ОКП.

Перечисленные конструкции проверены в стендовых и промышленных условиях, и хотя отдельные из них и требуют некоторой доработки, но на данном этапе они являются наиболее эффективными при бурении в очень крепких, сильно абразивных породах.

Для менее крепких пород с меньшей степенью абразивности, таких, как крепкие известняки и доломиты, слабые перидотиты, филлиты и другие, целесообразно применять долота с вооружением типа вооружения долот 5Н-190-ОК, 8Н-214-ОК, 1К-214-ОКП, 2Н-269-ОК. У этих долот несколько большие вылет зубков, шаг зубков и воротники, однако в целом вооружение достаточно стойкое и работоспособное при разбуривании подобных формаций пород. Условия работы долот при бурении в таких породах менее жесткие и скол зубков происходит реже, а несколько увеличенный вылет зубков способствует увеличению механической скорости бурения.

В этих долотах допустимо также несколько большее скольжение зубков по забою скважины, т. е. шарошки могут выполняться более полными с большим эффектом самоочищения, что дает возможность увеличить толщину их стенки, а в некоторых случаях разместить более прочные опоры.

Долота малых диаметров

При подземной разработке рудных месторождений, на карьерах средней и малой производительности, при селективной выемке полезных ископаемых, при строительстве наземных гидротехнических сооружений требуется бурение взрывных скважин диаметром 145 *мм* и меньше.

Попытки применения серийных шарошечных долот малых диаметров геологоразведочного (93 и 112 *мм*) и нефтяного (97 и 118 *мм*) сортаментов для бурения взрывных скважин не дали положительных результатов. Эти долота имели слабое для бурения в крепких породах вооружение и довольно быстро выходили из строя, давая небольшую проходку.

В связи с этим установилось устойчивое мнение о невозможности создания достаточно работоспособных шарошечных долот диаметром 112, 97 и в особенности 76 *мм* для бурения взрывных скважин в абразивных крепких и очень крепких породах.

В 1961—1962 гг. перед Всесоюзным научно-исследовательским институтом буровой техники была поставлена задача создать шарошечные долота диаметром 76, 97 и 112 *мм*, в первую очередь типа ОК, для бурения в крепких абразивных породах, а также долота этих размеров других типов.

Особые трудности в создании шарошечных долот таких малых размеров заключаются в необходимости размещения в весьма ограниченных габаритах шарошек достаточно работоспособных опор. Работы велись как по выбору наилучшей схемы опор шарошек, так и созданию эффективного и износостойкого вооружения.

Были разработаны конструкции трех вариантов опор шарошек в долотах этого размера.

I вариант (рис. 39, *а*). Концевая радиальная опора скольжения с втулкой и упорным подпятником, запрессованными в шарошки, шариковый (замковый) подшипник с шарами диаметром 6,35 *мм* и периферийная радиальная опора скольжения. Для упрочнения поверхности опор скольжения были наплавлены твердым сплавом с последующей обработкой концевая опора — с торца и по диаметру, периферийная — по диаметру.

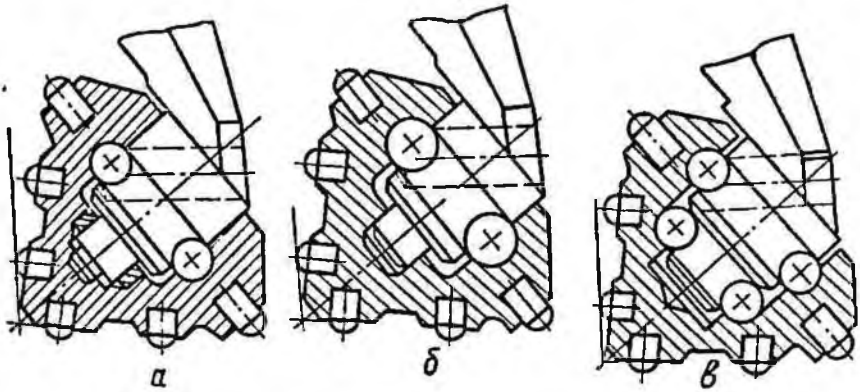


Рис. 39. Схемы опор долот диаметром 76 *мм*.
а — I вариант; *б* — II вариант; *в* — III вариант.

II вариант (рис. 39, *б*). Двухрядная радиальная опора скольжения и средний шариковый (замковый) упорный подшипник с шарами диаметром 7,938 *мм*.

III вариант (рис. 39, *в*). Двухрядная радиально-упорная шариковая опора качения с шариками диаметром 6,35 *мм*; один из шариковых подшипников (периферийный) выполняет функции замка. Шарошки долот со всеми вариантами опор имели одинаковое вооружение.

Испытания долот с тремя вариантами опор для выбора наилучшего варианта производились при бурении скважины станками ЗИФ-650А с осевой нагрузкой до 2,5 *Т*, числом оборотов в минуту 277 и производительностью насосов 60—70 *л/мин*.

Наиболее работоспособной из трех опор оказалась опора с двумя подшипниками скольжения в сочетании со средним шариковым (замковым) подшипником качения (II вариант). Двухрядная шариковая опора качения (III вариант) приобретает в результате даже непродолжительной работы на забое значительные люфты, а I вариант опоры, с наплавкой опор скольжения твердым сплавом, оказался сложным в изготовлении ввиду малого диаметра цапф и возможного

их пережога в процессе наплавки. Кроме того, запрессовываемые в шарошку втулка и подпятник в значительной степени ослабляют тело шарошки, что может привести к образованию в ней трещин в процессе бурения. Существенного влияния на стойкость опор при наплавке их твердым сплавом в долотах столь малого диаметра получено не было.

Таким образом, наилучшим оказался II вариант опоры, хотя, как показали испытания, и он не был лишен слабых мест. Применение в замковом подшипнике шариков повышенного размера (7,938 *мм*)

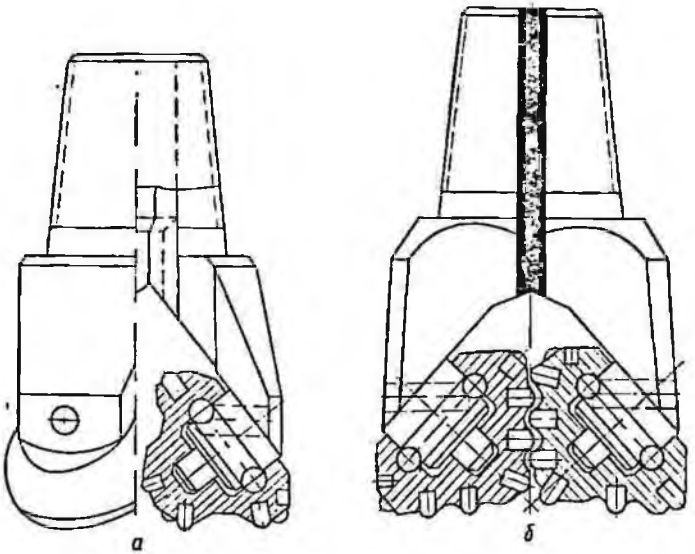


Рис. 40. Долота диаметром 76 *мм* в разрезе.
а — 4Н-76-ОК; *б* — 3Н-76-ОК.

вызвало уменьшение диаметра беговой дорожки на цапфах до 10,6 *мм* против 12,6 *мм* при использовании шариков диаметром 6,35 *мм*, что привело к ослаблению сечения цапфы и явилось причиной поломок цапф на нескольких долотах.

В последующих конструкциях шарошечных долот диаметром 76 *мм* использована одна схема опор шарошек: двухрядная опора скольжения в сочетании со средним шариковым подшипником качения с шариками диаметром 6,35 *мм*.

На этой опоре были изготовлены трехшарошечные долота с двумя вариантами вооружения: 2Н-76-ОК и 4Н-76-ОК (рис. 40, *а*). Последнее отличается усиленным вооружением: уменьшены воротники, уменьшен шаг зубков и их вылет над телом шарошки.

Кроме того, на подобной же опоре, лишь несколько большей по габаритам, было изготовлено двухшарошечное долото 3Н-76-ОК (рис. 40, *б*).

В табл. 31 приведены основные параметры вооружения указанных трех вариантов конструкции долот диаметром 76 *мм*.

Таблица 31

Шифр долота	Количество зубков			Шаг зубков, мм	Воротники, мм		Вылет зубков, мм	
	всего	в том числе диаметром			средний	максимальный	на вершине и средних венцах	на периферийных венцах
		4 мм	5 мм					
2Н-76-ОК	51	10	41	9—13	2.5	3.5	1.5	3.0
4Н-76-ОК	77	9	68	8.5—10	1.2	2.0	1.5	2.0
3Н-76-ОК	78	—	78	7.5—12	—	—	1.5	2.0

Эти долота были испытаны при бурении взрывных скважин на строительстве порта Находка в диоритах и гранодиоритах с коэффициентом крепости по Протодьяконову $f = 13 \div 17$.

Скважины глубиной 3,5—7,0 *м* бурили установкой БТС-2 при 120—140 *об/мин*, осевой нагрузке 3,5—5 *Т* и расходе воздуха в качестве рабочего агента 8,5—9 *м³/мин*. Результаты испытаний долот представлены в табл. 32.

Таблица 32

Шифр долота	Число отработанных долот	Пробурено, м	Время механического бурения, ч	Средняя проходка на долото, м	Средняя механическая скорость бурения, м/ч
2Н-76-ОК	7	92.3	10.2	13.2	9.05
4Н-76-ОК	8	356.0	34.2	44.5	10.42
3Н-76-ОК	4	105.1	14.8	26.3	7.10

Как видно из табл. 32, лучшие показатели как по проходке на долото, так и по механической скорости бурения получены у трехшарошечных долот 4Н-76-ОК.

У долот 2Н-76-ОК наблюдался массовый скол зубков (до 90%) на периферийных венцах, имеющих вылет над телом шарошки 3 *мм*. У долот 3Н-76-ОК и 4Н-76-ОК скол зубков носил единичный характер, износ их по высоте также был незначительным.

Долота выходили из строя: 2Н-76-ОК — из-за износа (в основном скола зубков) вооружения; 3Н-76-ОК и 4Н-76-ОК — главным образом из-за износа опорных подшипников, причем имели место случаи заклинивания шарошек.

В период испытаний долот 4Н-76-ОК было проведено пять экспериментальных взрывов скважинных зарядов.

Результаты экспериментальных взрывов показывают, что дробление пород равномерное, развал компактный, отсутствуют разброс породы, пороги и заколы, выход негабаритного сырья от нуля до 3% с ребром 500 *мм*. При промышленных взрывах (с бурением скважин

диаметром 145 *мм*) выход негабаритного сырья с таким же ребром составляет 15—20%, дробление было неравномерное, наблюдались пороги и заколы в глубь массива.

Кроме того, бурение взрывных скважин шарошечными долотами диаметром 76 *мм* оказалось значительно производительнее других способов бурения скважин малого диаметра, применяемых в промышленности.

Испытания долот 4Н-76-ОК были продолжены при бурении взрывных и цементационных скважин на строительстве Красноярской ГЭС, а также при бурении взрывных скважин в условиях строительства транспортных сооружений.

На строительстве Красноярской ГЭС долота 4Н-76-ОК были испытаны при бурении нисходящих цементационных скважин глубиной до 70 *м* в мелкозернистых гранитах, граносиенитах и гранитпорфирах с коэффициентом крепости $f = 16 \div 18$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова.

Для бурения использовались станки ЗИФ-300М со штангами диаметром 50 *мм*.

Бурение осуществлялось при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *Т*	3—5
Скорость вращения долота, *об/мин*	102—237
Расход воды, *л/мин*	120

В табл. 33 приведены показатели работы долот 4Н-76-ОК в сравнении с показателями работы алмазных и дробовых коронок, отработанных в тех же условиях.

Таблица 33

Шифр породоразрушающего инструмента	Количество отработанных инструментов	Пробурено, *м*	Средняя проходка на породоразрушающий инструмент, *м*	Средняя механическая скорость бурения, *м/ч*	Примечание
Шарошечные долота 4Н-76-ОК	16	347.9	21.8	5.28	—
Алмазные коронки МВ1-76 и $МВЗ_2$-76	33	117.0	3.55	0.64	Бурение велось станками ЗИФ-300М
Дробовые коронки диаметром 110 *мм*	10	45.0	4.5	0.2—0.3	То же

По сравнению с бурением погружными пневмоударниками (коронки К-100В, пневмоударники М1900УК, станки БМК-4) средняя

производительность бурения долотами 4Н-76-ОК в условиях Красноярской ГЭС оказалась выше в 2 раза.

Серийное производство указанных долот под шифром Ш760К освоено в 1965 г. Востокмашзаводом.

Долота диаметром 97 мм

В 1963 г. во ВНИИБТ были разработаны три конструкции трехшарошечных долот типа ОК диаметром 97 *мм*: 1Н-97-ОК (I вариант), 1П-97-ОК (II вариант) и 2Н-97-ОК с двухрядными радиальными опорами скольжения и средним шариковым (замковым) подшипником качения.

Долота отличались лишь схемами вооружения шарошек. У долота 2П-97-ОК только вершина одной из шарошек участвует в разбуривании центральной зоны забоя скважины, две другие шарошки имеют форму усеченных конусов. Вооружение шарошек 1Н-97-ОК (I вариант) соответствует вооружению шарошек долота 2Н-76-ОК, а вооружение шарошек долота 1-97-ОК (II вариант) — вооружению шарошек долота 4П-76-ОК.

Стендовые и промышленные испытания показали, что наилучшими по стойкости вооружения являются долота 1Н-97-ОК (II вариант). При бурении цементационных скважин глубиной до 70 *м* на строительстве Красноярской ГЭС в граносиенитах с коэффициентом крепости до 16 по шкале проф. М. М. Протодьяконова станками ЗИФ-300М с промывкой водой долота 1Н-97-ОК (II вариант) показали среднюю проходку 31,7 *м* при средней механической скорости бурения 3,5—5 *м/ч*. Средняя производительность на станко-смену составила 7,9 *м* против 1,54 *м* при дробовом бурении и 4 *м* при бурении коронками К-100В с погружным пневмоударником М1900УК. Аналогичные результаты получены на строительстве Саяно-Шушенской ГЭС.

По результатам промышленных испытаний долота 1Н-97-ОК (II вариант) рекомендованы к серийному изготовлению. Серийное производство этих долот под шифром В97-ОК начато с 1966 г. на Верхне-Сергинском долотном заводе.

Долота диаметром 112 мм

Первая конструкция штыревого долота диаметром 112 *мм* 2-112К, разработанная ВНИИБТ, имела опору, выполненную по схеме ролик — шарик — опора скольжения с упорной пятой и втулкой, запрессованными в шарошку. Цапфу наплавляли твердым сплавом В2КС.

Вооружение шарошек выполнено из твердосплавных зубков диаметром 5 *мм* на периферийных венцах и 4 *мм* на вершине и средних венцах. Тыльная часть шарошек наплавлялась зерновым твердым сплавом релит.

Испытанные при бурении крепких пород в Ленинабадской области на станках ЗИФ-650А при осевых нагрузках 3,5—4 *Т* и скорости вра-

щения 153—277 *об/мин* долота 2-112К показали удовлетворительные результаты как по проходке на долото, так и по механической скорости бурения. Однако осмотр отработанных долот показал, что большинство из них имело значительный скол зубков и большую сработку по диаметру.

В связи с этим конструкция долота была пересмотрена. Увеличен диаметр зубков на периферийных венцах до 6 *мм* и на остальных до 5 *мм*. Наплавка тыльной части шарошек зерновым твердым сплавом заменена запрессовкой твердосплавных зубков диаметром 4 *мм*.

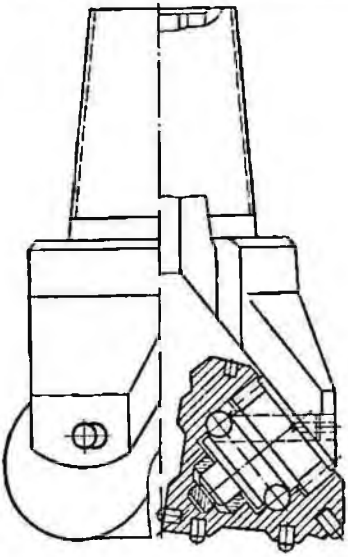


Рис. 41. Долото ЗН-112-ОК в разрезе.

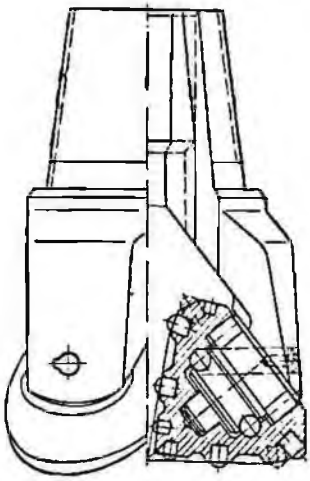


Рис. 42. Долото Н-145-ОК в разрезе.

Первая партия новых долот под шифром ЗН-112-ОК (рис. 41) была изготовлена на экспериментальном заводе ВНИИБТ и испытана в Кривом Роге при бурении глубокой скважины в интервале 1100—1200 *м* в крепких абразивных породах, представленных мартитовыми роговиками и джеспилитами ($f = 16 \div 18$).

Испытания показали работоспособность конструкции.

Последующие партии долот ЗН-112-ОК испытывались при бурении взрывных скважин в габбро ($f = 8 \div 12$) с продувкой воздухом (станки БТС-2, осевая нагрузка 7—9 *Т*, скорость вращения долота 120—140 *об/мин*). Средняя проходка на долото составила 60 *м* при механической скорости бурения 11,5 *м/ч*.

Производительность бурения на станко-смену в 3,3 раза выше, чем при бурении погружными пневмоударниками.

Высокие результаты были получены также при бурении долотами ЗН-112-ОК в мелкозернистых граносиенитах с коэффициентом крепости до 16 станками ЗИФ-300М на строительстве Красноярской ГЭС.

Полученные результаты позволили рекомендовать долота ЗН-112-ОК к серийному производству. Чертежи долот переданы Востокмашзаводу для освоения серийного производства (под шифром Ш112-ОК).

Долота диаметром 145 мм

В 1965 г. ВНИИБТ была разработана новая конструкция трехшарошечного долота Н-145-ОК (рис. 42), опоры которого выполнены по схеме: роликовый подшипник — средний шариковый подшипник (замок) — концевая опора скольжения, а вооружение шарошек аналогично вооружению шарошек долот 4Н-76-ОК.

Опытная партия этих долот в 1966 г. была испытана на руднике им. 40-летия ВЛКСМ Лениногорского полиметаллического комбината.

Бурение восстающих скважин глубиной до 32 *м* производилось в микрокварцитах с коэффициентом крепости $f = 10 \div 16$ на станках БШ-145 при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *Т*	10—15
Скорость вращения долота, *об/мин*	180
Расход воды, *л/мин*	100—130

В табл. 34 приведены показатели работы долот Н-145-ОК в сравнении с показателями работы серийных долот 6Л-145-ОК.

Таблица 34

Шифр долота	Количество отработанных долот	Пробурено, *м*	Средняя проходка, *м*	Средняя механическая скорость бурения, *м/ч*
Н-145-ОК	25	1115	44.7	16
6Л-145-ОК	21	536	22.5	14

Анализ результатов отработки долот Н-145-ОК показал, что проходка на эти долота и механическая скорость бурения ими превышает соответствующие показатели работы серийных долот 6Л-145-ОК соответственно на 75 и 15%.

По результатам испытаний долота Н-145-ОК рекомендованы для серийного производства. В 1967 г. Востокмашзавод осваивает серийное производство этих долот под шифром Ш145-ОК.

Выводы

В результате проведенных ВНИИБТ научно-исследовательских и экспериментально-конструкторских работ в настоящее время создан и внедрен в промышленность высокоэффективный нормальный ряд шарошечных долот типа ОК (ОКП) диаметрами 76, 97, 112, 145, 190, 244, 253 и 269 *мм*, предназначенных для бурения скважин в хрупких абразивных очень крепких горных породах. В стадии завершения находятся работы по созданию и внедрению долот типа ОКП диаметрами 295 и 320 *мм*.

Глава VI

ШАРОШЕЧНЫЕ ДОЛОТА ДЛЯ БУРЕНИЯ В АБРАЗИВНЫХ ТВЕРДЫХ ВЯЗКИХ ПОРОДАХ

С широким внедрением бурения шарошечными долотами в горнорудную промышленность стало очевидным, что долота типа К и ОК могут быть достаточно эффективными лишь при бурении в крепких и очень крепких абразивных породах, обладающих более или менее значительной хрупкостью. При бурении же в твердых абразивных, но более вязких породах эти долота хотя и имеют хорошую часовую стойкость, но уступают другим типам долот по механической скорости бурения и по проходке на долото.

Для этого типа пород более эффективным будет вооружение с клинообразной формой рабочей поверхности, аналогичное вооружению долот типа Т, широко применяемым при бурении нефтяных скважин. Однако долота со стальными фрезерованными из тела шарошек зубьями для бурения в абразивных породах непригодны из-за быстрого их износа.

Поэтому возникла необходимость в создании нового типа долот, стойких к абразивному износу и способных достаточно эффективно разбуривать твердые вязкие породы.

В 1962 г. во ВНИИБТ были разработаны долота типа ТЗ диаметрами 145 и 214 *мм* под шифрами соответственно 1Н-145-ТЗ и 1Н-214-ТЗ (рис. 43), основным отличительным признаком которых является вооружение шарошек, состоящее из твердосплавных зубков, профиль рабочих поверхностей которых аналогичен профилю рабочих поверхностей фрезерованных зубцов шарошек долот типа Т.

Обратные конусы шарошек этих долот армированы запрессованными твердосплавными зубками цилиндрической формы (типа 2СЦ).

Опоры этих долот такие же, как у долот типа ОК соответствующих размеров: 6Н-145-ОК и 8Н-214-ОК.

В последних просверлены продувочные каналы в лапах и их цапфах для предохранения опор от зашламления.

Долота 1Н-145-ТЗ выполнены в двух вариантах: с каналами в лапах — для бурения с продувкой воздухом и без каналов — для бурения с промывкой водой.

У долот обоих размеров грани твердосплавных зубков, запрессованных на венцах основных конусов шарошек, направлены вдоль образующей шарошек, а на периферийных венцах зубки чередовались: часть зубков запрессована с направлением граней по образующей, часть — перпендикулярно к ней.

Опытные партии долот 1Н-145-ТЗ и 1Н-214-ТЗ были испытаны в 1963 г.: первые на руднике им. XXII съезда КПСС Зыряновского свинцово-цинкового комбината, вторые на карьере Ждановского горнообогатительного комбината.

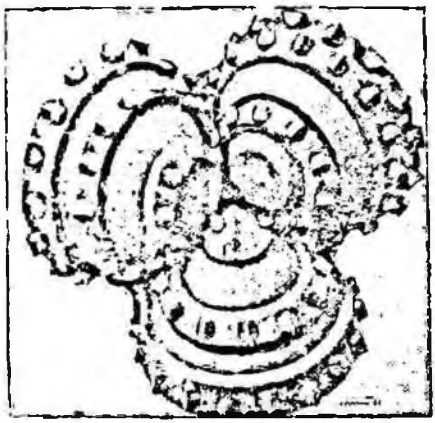


Рис. 43. Долото 1Н-214-ТЗ, вид сверху.

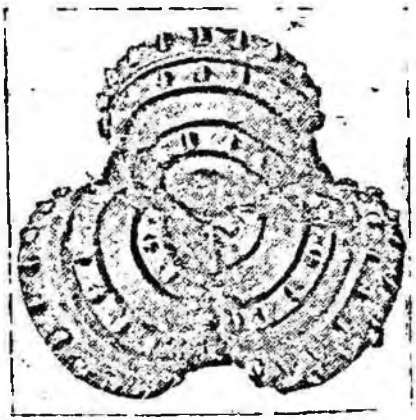


Рис. 44. Долото 2Н-214-ТЗ, вид сверху.

И те и другие долота показали удовлетворительные результаты: достаточно высокую стойкость и бóльшую по сравнению с долотами типов К и ОК механическую скорость бурения.

Однако в процессе испытания был выявлен ряд существенных недостатков в конструкции этих долот, приводящих к их преждевременному выходу из строя.

Так, у большинства долот наблюдался значительный скол твердосплавных зубков, особенно тех из них, которые расположены гранями перпендикулярно к образующей конуса шарошки. У некоторых долот преждевременно выходила из строя вершина первой шарошки вследствие малой ее вооруженности.

Таким образом, конструкция долот требовала переработки в направлении усиления вооружения шарошек.

С учетом выявленных замечаний были разработаны новые конструкции долот типа ТЗ диаметром 145 и 214 *мм* под шифрами соответственно 2Н-145-ТЗ и 2Н-214-ТЗ (рис. 44). В новых долотах опора оставлена без изменения, а вооружение переработано в следующем направлении:

— принята новая форма рабочей поверхности твердосплавных зубков (зубки типа ЗСЦ), в которых рабочая грань округлена с фасками на углах, что снижает возможность их скалывания;

— уменьшен вылет зубков над телом шарошки;

— направление режущих кромок твердосплавных зубков на всех вещах принято вдоль образующей шарошек;

— у долот 2Н-214-ТЗ усилено вооружение вершины первой шарошки, а долото 2Н-145-ТЗ выполнено с вооруженными твердосплавными зубками вершинами всех трех шарошек, т. е. все три шарошки разрушают центральную зону забоя скважины.

Большие опытные партии долот 2Н-214-ТЗ и 2Н-145-ТЗ, изготовленные на Поваровском опытном заводе, были испытаны на карьерах комбинатов «Апатит» и Ураласбест, Балаклавского рудоуправления, треста Вахрушевуголь и ряда других предприятий.

В тресте Вахрушевуголь долота 2Н-145-ТЗ испытывались при бурении взрывных скважин в окварцованных известняках с прослойками бокситов ($f = 6 \div 10$) на станках БШ-150 при осевой нагрузке на долото до 6 *Т*, скорости вращения долот 72 *об/мин* и расходе воздуха до 6 *м*³/*мин*. По сравнению с обычно применяемыми на этом предприятии серийными долотами 4В-6аТ и 4В-6аС диаметром 140 *мм* опытные долота 2Н-145-ТЗ дали увеличение средней проходки на долото в 2—2,4 раза (до 240 *м*) при одновременном увеличении механической скорости бурения на 35—50%. Увеличение проходки на долото здесь объясняется более стойким к абразивному износу вооружением. Механическая скорость бурения долотами типов С и Т в начальный период бурения была одинаковой с механической скоростью бурения долотами типа ТЗ, но впоследствии ввиду интенсивного износа стальных зубцов у долот типов С и Т она быстро снижалась, в то время как у долот типа ТЗ, вооруженных твердосплавными зубками, скорость практически не менялась.

Основная причина выхода долот 2Н-145-ТЗ из строя — выпадение роликов периферийного подшипника из-за износа козырьков лап, обусловленного недостаточной очисткой забоя. Вооружение у многих долот оставалось работоспособным.

При разбуривании апатитовых руд с коэффициентом крепости 6—10 на подземных рудниках комбината «Апатит» долота 2Н-145-ТЗ дали увеличение проходки по сравнению с долотами того же размера типа ОК на 30—40% в основном за счет увеличения механической скорости бурения при одинаковой часовой стойкости долот.

В табл. 35 приведены результаты испытаний долот 2Н-214-ТЗ по некоторым предприятиям. Сюда включены сведения только по тем долотам, по которым велись хронометражные наблюдения для определения механической скорости бурения и изучения износа вооружения шарошек.

Приведенные в табл. 37 данные свидетельствуют о том, что при бурении в вязких породах различной крепости (с f от 6 до 12) и при различных режимах бурения долота типа ТЗ неизменно давали лучшие показатели по сравнению с долотами других типов как по проходке

Таблица 35

Предприятие	Коэффициент крепости f	Шифр долота	Количество отработанных долот	Пробурено, м	Средние показатели на долото		Параметры режима бурения		
					проходка, м	механическая скорость, м/ч	осевая нагрузка, Т	скорость вращения, об/мин	расход воздуха, м³/мин
Рудник Расвумчорр-цирк комбината «Апатит»	8—10	2Н-214-ТЗ	9	4 067	453	9—12	14—15	80—120	13.5
	8—10	8Н-214-ОК	18	3 066	170	6.5—7.0	14—15	80—120	13.5
Юкспорский и Центральный рудники комбината «Апатит»	6—8	2Н-214-ТЗ	4	2 473	618	12—15	10—17	66—88	13
	6—8	8Н-214-ОК	13	2 662	197	9—11	10—17	66—88	13
Кадыковский рудник Балаклавского рудоуправления	6—8	2Н-214-ТЗ	14	20 273	1448	12—15	15—17	88—176	9
	6—8	21К-9-ТК	27	6 190	229	10—12	15—17	88—176	9
	6—8	К9-ОК	11	5 257	478	8—10	15—17	88—176	9
	6—8	40К-214-ТК	12	10 293	858	11—13	15—17	88—176	9
	6—8	1К-214-ОК	2	853	427	8—10	15—17	88—176	9
	6—8	8Н-214-ОК	6	3 935	656	8—10	15—17	88—176	9
	6—8	К-214-Т	7	943	134	10—12	15—17	88—176	9
Балаклавский рудник Балаклавского рудоуправления	8—10	2Н-214-ТЗ	3	3 090	1030	12—15	11—13	88	18
	8—10	8Н-214-ОК	8	5 660	708	10—12	11—13	88	18
Северный рудник комбината Ураласбест	12—14	2Н-214-ТЗ	15	2 278.5	151.9	8—9	14	100—120	15
	12—14	1В-190-Т	82	4 928	60.1	7—7.5	12—14	100—120	15
	12—14	8В-190-К	9	810	89	6—7	12—14	100—120	15
	12—14	ОМ-575-8Т	100	3 012	30.1	7—7.5	12—14	100—120	15
	12—14	К-9Т	36	2 016	56.0	6—7	14	100—120	15

на долото, так и по механической скорости бурения. Промышленные испытания долот типа ТЗ выявили их работоспособность и высокую эффективность при бурении в абразивных вязких породах.

Большинство отработанных долот имели равномерный износ вооружения. Скол зубков на некоторых долотах был незначительным и на стойкости долота почти не отразился.

Долота в основном выходили из строя из-за истирания зубков от абразивного воздействия породы или же вследствие заплывания опор и их заклинивания в результате недостаточной очистки забоя скважины от выбуренной породы или же бурения в обводненных условиях, без обратного клапана. Часть долот 2Н-214-ТЗ вышла из строя в результате износа вершины первой шарошки и образования на забое скважины «сахарной головки».

По результатам промышленных испытаний долота 2Н-145-ТЗ и 2Н-214-ТЗ рекомендованы к серийному производству. Опытная партия долот 115К-214-КП, аналогичных по конструкции долотам 2Н-214-ТЗ, выпущена на Куйбышевском долотном заводе.

В 1963 г. были разработаны долота типа ТЗ диаметром 190 *мм* под шифром 1Н-190-ТЗ. Схема опоры в долоте заимствована из конструкции 7Н-190-ОКП, а вооружение шарошек выполнено аналогично вооружению долота 2Н-214-ТЗ. На периферийных венцах запрессованы зубки диаметром 10 *мм*, а на остальных 8 *мм*.

Испытания долот 1Н-190-ТЗ проведены на руднике Аксай комбината Кара-Тау и руднике Кальмакыр Алтын-Топканского комбината при бурении станками БСШ-1М и БСШ-2М в абразивных доломитизированных трещиноватых известняках с коэффициентом крепости 8—12 при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *Т*	13—15
Расход воздуха, *м³/мин*	10
Скорость вращения долота, *об/мин*:	
на руднике Аксай	80—150
на руднике Кальмакыр	180—220

На обоих рудниках получены аналогичные результаты. Проходка на долото достигала 400 *м* и более и по сравнению с серийными долотами типа Т (ОМ-21-8Т и 1В-190-Т) увеличилась в 2,5—3,5 раза при увеличении механической скорости бурения на 10—20% (табл. 36). Характер износа долот и причины выхода их из строя такие же, как и у 2Н-214-ТЗ.

Испытания долот 1Н-190-ТЗ проводились в 1966 г. на рудниках Сорского комбината, Балаклавского рудоуправления и др.

Для бурения на открытых горных работах были сконструированы также долота типа ТЗ диаметром 243 и 269 *мм*.

В долоте 243-ТЗП-000-1 (рис. 45) опора заимствована из конструкции долота 243-ОКП, а вооружение выполнено аналогично вооружению долот 190-ТЗ и 214-ТЗ. Вершины шарошек вооружены

Таблица 36

Предприятие	Шифр долота	Количество отработанных долот	Пробурено, м	Коэффициент крепости	Средняя проходка на долото, м	Средняя механическая скорость бурения, м/ч
Рудник Кальмакыр Алтын-Топканского комбината	1Н-190-ТЗ	9	3 572	8—12	398.0	15
	ОМ-21-8Т	21	2 486	8—12	118.3	13
Рудник Аксай комбината «Кара-Тау»	1Н-190-ТЗ	10	4 454	8—12	445.4	15
	ОМ-21-8Т	91	11 926	8—12	131.5	13
	1В-190-Т	54	4 592	8—12	85.2	13

зубками 3СЦ диаметром 10 *мм*, а средние и периферийные венцы зубками диаметром 12 *мм*.

Обратные конусы шарошек и спинки лап армированы зубками 2СЦ диаметром 8 *мм*.

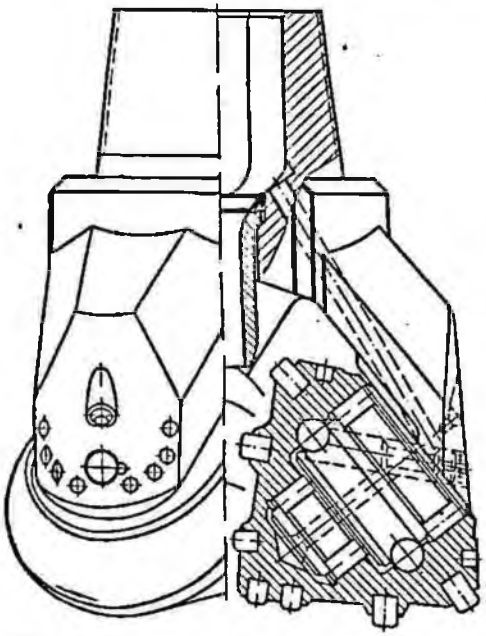


Рис. 45. Долото 243-ТЭП-000-1 в разрезе.

Опытная партия долот 243-ТЗП в количестве 80 шт. изготовлена на Поваровском опытном заводе и в 1966 г. испытывалась в промышленных условиях на рудниках Оленегорского и Ждановского горнообогатительного комбинатов.

Долото 269-ТЗП по конструкции аналогично долоту 243-ТЗП.

Куйбышевским долотным заводом выпускается долото под шифром 40К-214-ТК, по вооружению аналогичное долоту 2Н-214-ТЗ и отличающееся от последнего лишь тем, что форма твердосплавных зубков в этом долоте не 3СЦ, а Г-14 (ГОСТ 880-62), т. е. такая же, как у долота 1Н-214-ТЗ.

Долота 40К-214-ТК прошли широкие промышленные испытания как при бурении нефтегазовых скважин, так и при бурении взрывных скважин на горных предприятиях. В целом долота дали положительные результаты, превышающие показатели работы долот дру-

гих типов, выпускаемых Куйбышевским долотным заводом (К-214-К, 21К-214-ТК и К-214-Т). Однако при бурении взрывных скважин в крепких породах долота 40К-214-ТК имели значительный скол твердосплавных зубков, обусловленный конструктивными особенностями их формы. А по проходке на долото долота 40К-214-ТК значительно уступают долотам 2Н-214-ТЗ (см. табл. 37).

В связи с этим Куйбышевским долотным заводом эта конструкция долота была переработана. Новое долото под шифром 115К-214-КП разработано на основе долота 2Н-214-ТЗ конструкции ВНИИБТ. Геометрические формы и размеры шарошек полностью заимствованы из конструкции этого долота. Зубки приняты формы 3СЦ (Г-25 ГОСТ 880-63) из твердого сплава ВК15, обладающего повышенной по сравнению со сплавом ВК8 прочностью. На периферийных венцах шарошек запрессованы зубки диаметром 12 *мм* с вылетом над поверхностью тела шарошек 4,7 *мм*, на остальных венцах зубки диаметром 10 *мм* с вылетом 3,7 *мм*. Экспериментальные образцы долота 115К-214-КП в количестве 5 шт. изготовлены заводом в конце 1965 г. и в 1966 г. испытывались на одном из рудников комбината «Апатит».

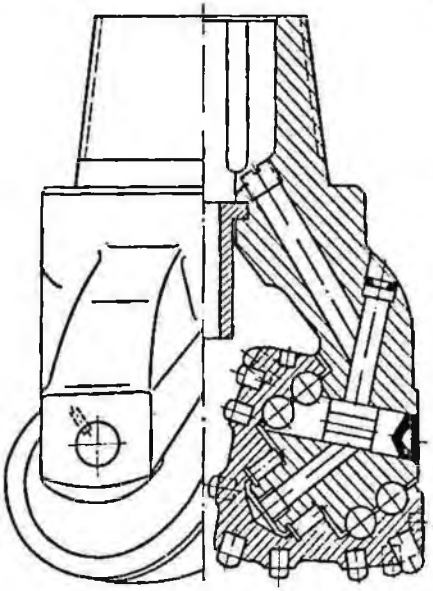


Рис. 46. Долото 113К-214-КП в разрезе

Куйбышевским долотным заводом разработана также конструкция долота 113К-214-КП (рис. 46), отличающаяся от долота 115К-214-КП как схемой опоры, так и вооружением.

Опора выполнена с двойным шариковым замком с шарами диаметром 12,7 *мм* и концевым роликовым подшипником с роликами 8 × 16 *мм*. Для улучшения охлаждения опорных подшипников продувочные каналы в лапах выполнены увеличенного диаметра по сравнению с серийными долотами. Увеличены также зазоры между буртами цапфы и шарошки до 3 *мм* против 1—1,5 *мм* у серийных долот.

Вооружение шарошек представлено зубками из твердого сплава ВК15 с клиновидно-сферической породоразрушающей поверхностью, предложенной Всесоюзным научно-исследовательским институтом твердых сплавов (ВНИИТС). От зубков 3СЦ эта форма отличается тем, что грани клина имеют не плоскую форму, а сферическо-

выпуклую, что должно повысить их сопротивляемость сколу. Принцип размещения зубков на поверхности шарошек у этих долот такой же, как и у долот 115К-214-КП. Первые опытные образцы долот 113К-214-КП также испытывались в 1966 г. на одном из рудников комбината «Апатит».

Долото 59К-190-КП, также разработанное Куйбышевским долотным заводом, по вооружению аналогично долоту 1Н-190-ТЗ.

Твердосплавные зубки 3СЦ из сплава ВК15 запрессованы с вылетом над телом шарошки на периферийных венцах 4,5 *мм* и на остальных 3,7 *мм*. Обратные конусы шарошек армированы твердосплавными зубками 2СЦ. Опора выполнена с двойным шариковым замком с шарами диаметром 11,113 *мм* и концевым роликовым подшипником с роликами 8 × 16 *мм*.

Первая опытная партия этих долот изготовлена и испытывалась в 1966 г.

Положительные результаты внедрения долот типа ТЗ диаметром 145, 190 и 214 *мм* при бурении взрывных скважин на открытых горных работах выявили работоспособность и эффективность вооружения долот этого типа.

Для расширения параметрического ряда долот, предназначенных для бурения в абразивных вязких породах, во ВНИИБТ были разработаны конструкции долот типа ТЗ малых размеров (76, 97 и 112 *мм*) для бурения взрывных скважин в подземных условиях и на поверхности, где по техническим условиям требуется бурение скважин малого диаметра.

Долото Н-76-ТЗ диаметром 76 *мм*. Опора долота полностью заимствована из конструкции долота 4Н-76-ОК. Шарошки самоочищающегося типа с вооружением в виде твердосплавных зубков формы 3СЦ диаметром 5 *мм* на периферийных и средних венцах и диаметром 4 *мм* на вершинах шарошек, вершины всех трех шарошек также вооружены твердосплавными зубками. Вылет зубков над телом шарошки составляет 2,1 *мм* для зубков диаметром 5 *мм* и 1,6 *мм* для зубков диаметром 4 *мм*. Несколько уменьшенный по сравнению с другими долотами типа ТЗ вылет зубков объясняется их небольшим диаметром и, следовательно, повышенной способностью к скалыванию.

Кроме того, учитывается то, что при столь малых габаритах долота венцы шарошек, особенно расположенные ближе к вершине, имеют большую кривизну и, следовательно, величина вылета зубка имеет номинальное значение только в центре отверстия, к периферийной же части отверстия уже бóльшая часть зубка выступает над поверхностью шарошки (практически вся клиновая часть).

Поэтому в долотах больших размеров следует на вершинах шарошек несколько уменьшать вылет зубков, особенно когда запрессовываются зубки диаметром 10, 12 *мм*. Часто при конструировании долот это не учитывается и при бурении в крепких породах наблюдается значительный скол зубков на вершинах шарошек.

Долото Н-97-ТЗ (рис. 47) диаметром 97 *мм*. Опора долота, выполненная по схеме опора скольжения — шариковый замок — опора скольжения, заимствована из конструкции долота 1Н-97-ОК.

Шарошки самоочищающегося типа с вершинами у всех трех шарошек вооружены твердосплавными зубками ЗСЦ диаметром 5 *мм* на вершинах и 6 *мм* на остальных венцах. Вылет зубков над телом шарошки составляет 1,5 *мм* для зубков диаметром 5 *мм* и 3 *мм* для зубков диаметром 6 *мм*. Обратные конусы шарошек армированы 4-*мм* зубками.

Долото Н-112-ТЗ диаметром 112 *мм*. Опора, как и в описанных выше долотах малого диаметра, выполнена по схеме два подшипника скольжения и один, средний, шариковый (замковый) подшипник качения.

Вооружение шарошек самоочищающегося типа выполнено из твердосплавных зубков ЗСЦ диаметром 5 *мм* на вершинах шарошек с вылетом над телом 1,5 *мм* и диаметром 6 *мм* на остальных венцах с вылетом 2,5 *мм* на средних венцах и 3,2 *мм* на периферийных.

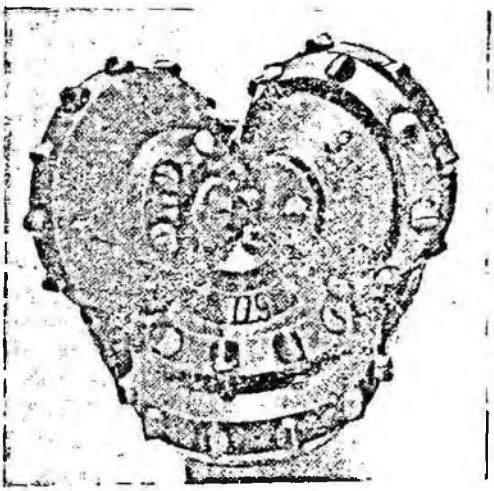


Рис. 47. Долото Н-97-ТЗ, вид сверху.

Вершины всех трех шарошек вооружены твердосплавными зубками. Обратные конусы шарошек армированы зубками диаметром 5 *мм*.

Опытные партии долот 76-ТЗ, 97-ТЗ и 112-ТЗ были изготовлены на экспериментальном заводе ВНИИБТ. Стендовые испытания этих долот при бурении блоков гранита, доломитизированных известняков и фосфоритовых руд на станке ЗИФ-1200А дали положительные результаты.

В 1966 г. проводились промышленные испытания этих долот при бурении взрывных скважин на строительстве Токтогульской гидроэлектростанции в Киргизской ССР.

В табл. 37 приведены предварительные результаты испытаний долот типа ТЗ диаметрами 76, 97 и 112 *мм*.

Долота Н76-ТЗ испытывались при бурении нисходящих вертикальных цементационных скважин в интервале глубин 40—80 *м*. Бурение велось в сцементированных конгломератах с включением кварцевого галечника ($f = 6 \div 8$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова).

Таблица 37

Шифр породоразрушающего бурового инструмента	Диаметр, *мм*	Количество отработанных долот	Общий пробуренный объем, *м*	Средняя проходка на долото, *м*	Средняя механическая скорость бурения, *м/ч*	Средняя производительность на станко-смену, *м*
Шарошечные долота Н76-ТЗ	76	15	670	44.5	5.2	12.4
Твердосплавные резцовые коронки УКВ-65	76	20	80	4	1.68	4
Шарошечные долота 1Н-97-ТЗ	97	15	1275	85	30	180
То же Н-112-ТЗ	112	15	1425	96	24	145
То же 6Л-145-ОК	145	20	2240	112	12	72

Для бурения использовались станки ЗИФ-300М. Бурение велось при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *кГ* . . . . . 600—800
Скорость вращения долота, *об/мин* 237
Расход воды, *л/мин* . . . . . до 100

В качестве базы для сопоставления приняты показатели бурения резцовыми твердосплавными коронками УКВ-65 диаметром 76 *мм*, которыми осуществляется бурение на этом предприятии. Коронки УКВ-65 отрабатывались при тех же параметрах режима бурения.

Долота 1Н-97-ТЗ и Н-112-ТЗ испытывались в сравнении с долотами 6Л-145-ОК диаметром 145 *мм* при бурении нисходящих вертикальных и наклонных (под углом до 60° к горизонтали) взрывных скважин. Бурение велось в доломитизированных известняках с коэффициентом крепости 6—8 по шкале проф. М. М. Протодьяконова на станках БТС-2 при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *Т* . . . . . 4—4.5
Скорость вращения долота, *об/мин* . . . . . 120—140
Расход сжатого воздуха, $м^3/мин$ 9

Следует отметить, что осевые нагрузки на долота Н76-ТЗ, равные 600—800 *кГ*, явно недостаточны для эффективного бурения, что явилось причиной низкой механической скорости бурения.

Из табл. 37 следует, что предварительные результаты испытаний долот типа ТЗ диаметрами 76, 97 и 112 *мм* подтверждают высокую эффективность их применения при бурении абразивных твердых вязких пород.

Полученные положительные результаты при отработке долот типа ТЗ различных размеров свидетельствуют о том, что этот тип долот очень эффективен при разбуривании широкого комплекса пород, слагающих месторождения твердых полезных ископаемых, и в дальнейшем наравне с долотами типа ОК, очевидно, получит самое широкое распространение при бурении взрывных скважин

в твердых вязких абразивных породах, т. е. где долота с фрезерованными зубьями быстро выходят из строя из-за износа вооружения, а долота типов К и ОК менее эффективны (по механической скорости бурения).

Долота типа ТЗ целесообразно применять при бурении скважин в породах с коэффициентом крепости до 10—12 и в очень ограниченных случаях до 14. Бурение этими долотами в более крепких породах будет нерентабельно, так как по сравнению с долотами, вооруженными твердосплавными зубками с полусферической формой рабочей поверхности, долота типа ТЗ имеют бо́льшую контактную поверхность с породой и, следовательно, для них следует применять бо́льшие осевые нагрузки, что не всегда допустимо или из-за технических возможностей буровых станков, или же из-за прочности опорных подшипников долот. Кроме того, слишком большие осевые нагрузки при бурении в очень крепких породах создают чрезвычайно жесткие условия работы вооружения долот, что приводит к скалыванию зубков с клиновой формой рабочей поверхности. Зубки с полусферической формой рабочей поверхности в этих условиях более стойки к разрушению вследствие как своих конструктивных особенностей, так и меньшего их вылета над телом шарошки.

Уменьшение же вылета зубков ЗСЦ у долот типа ТЗ имеет определенные пределы, ограниченные высотой клина. Если часть клина будет запрессована в шарошку, то это снизит эффективность бурения после некоторого притупления зубков типа ЗСЦ, а это обязательно будет иметь место при разбуривании очень крепких, сильно абразивных пород.

В долотах же типа ОК все зубки имеют полусферическую форму рабочей поверхности и в процессе бурения они ее почти не теряют, даже когда сильно изнашиваются.

Поэтому для бурения пород с коэффициентом крепости 14 и выше, а иногда и менее крепких, но достаточно хрупких лучшим типом вооружения будут зубки с полусферической формой рабочей поверхности (1СЦ), т. е. долота типа ОК. К тому же в этих долотах можно значительно уменьшить воротники вплоть до полной их ликвидации (долото 11Н-214-ОК), т. е. осуществить полное перекрытие забоя. Опорные подшипники шарошек при этом уменьшаются незначительно.

В долотах типа ТЗ, оснащенных зубками ЗСЦ, воротники всегда больше, чем в долотах типа ОК, вооруженных зубками 1СЦ.

Это объясняется как большей величиной вылета зубков над телом шарошки, так и конструктивными особенностями зубков ЗСЦ, имеющих форму клина. При расположении зубков с направлением рабочих граней вдоль образующей шарошки здесь имеется бо́льшая опасность зацепления зубков соседних венцов между собой, чем в долотах с зубками полусферической формы.

Поэтому в долотах типа ТЗ для получения полного перекрытия забоя или хотя бы сведения величины воротников к минимуму (1—2 *мм*) необходимо значительно уменьшать габариты шарошек

и соответственно ослаблять опорные подшипники, что снижает работоспособность долота.

Бурение же в очень крепких абразивных породах долотами, имеющими большие воротники, приведет к образованию на забое кольцевых выступов, не поражаемых зубками шарошек. Эти выступы по мере их роста начинают истирать тело шарошки по межвенцовым канавкам, приводя иногда к авариям с долотами.

Рис. 48. Долото 2Н-190-ТЗ, вид сверху.

Кроме того, воздействуя на шарошки, они, естественно, тормозят процесс бурения. Механическая скорость при этом падает.

Для повышения удельного давления на забой и уменьшения количества воротников в схеме перекрытия забоя в одном из вариантов долота — 2Н-190-ТЗ (рис. 48) — запрессовка зубков на венцах шарошек была выполнена в шахматном порядке. Ширина каждого венца при этом увеличивается, а общее их количество на каждой шарошке уменьшается и, следовательно, уменьшается общее количество воротников. Шахматное расположение зубков на соседних венцах обеспечивает повышение удельного давления на забой при бурении, так как при одной и той же осевой нагрузке в каждый момент времени на забой будет воздействовать меньшее количество зубков, чем при обычном их расположении.

При этом, естественно, шахматное расположение зубков будет способствовать более полному поражению забоя скважины.

Для предупреждения образования на забое «сахарной головки» долото 2Н-190-ТЗ выполнено с вершинами, вооруженными твердосплавными зубками у всех трех шарошек. Общее количество запрессованных в шарошки зубков осталось таким же, как и у долота 1Н-190-ТЗ. Без изменения остались и опорные подшипники.

Опытная партия долот 2Н-190-ТЗ испытывается в 1966—1967 гг. на рудниках Алтын-Топканского комбината, комбинатов «Апатит» и «Кара-Тау» и Балаклавского рудоуправления.

Глава VII

ШАРОШЕЧНЫЕ ДОЛОТА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВООРУЖЕНИЕМ

Долота типа ТК

Наряду с долотами типов К, ОК и Т3 в горнорудной промышленности при бурении взрывных скважин применяются долота типа ТК, имеющие комбинированное, зубчато-штыревое вооружение. Эти долота наиболее значительное применение получили при бурении перемежающихся по крепости и хрупкости пород при проходке нефтяных и газовых скважин. В горнорудной промышленности ввиду сравнительной монолитности пород долота типа ТК имеют меньшее применение.

Во ВНИИБТ были разработаны конструкции таких долот диаметром 190 и 214 *мм* под шифрами соответственно 7Н-190-ТК и 11Н-214-ТК (рис. 49) для бурения взрывных скважин в горнорудной промышленности. Опоры долот были заимствованы из конструкций соответствующих размеров долот типа ОК. Как и в последних, в лапах и цапфах долот типа ТК имелись каналы для продувки опор сжатым воздухом.

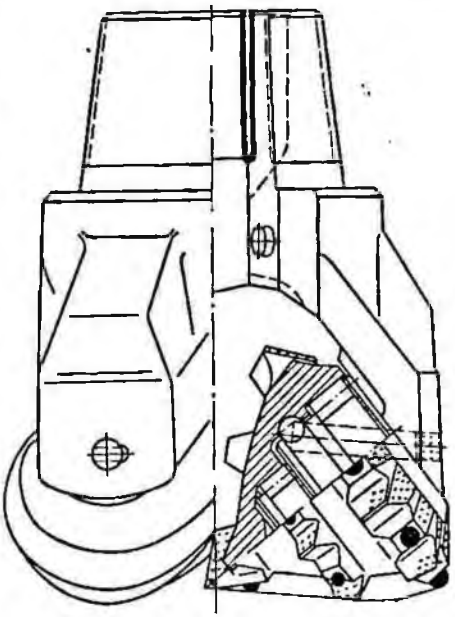


Рис. 49. Долото 11Н-214-ТК, общий вид.

Вооружение долот комбинированное — на каждом венце призматические стальные фрезерованные зубья чередуются с твердосплавными зубками с полусферической формой рабочей поверхности.

Схема расположения шарошек, условие калибровки шарошками стенок скважины, расположение венцов на шарошках и другие элементы долота приняты аналогичными долоту типа Т.

Эффективность бурения при использовании долот с подобным вооружением в перемежающихся породах достигается следующим. При разбуривании твердых пластичных пород разрушение забоя осуществляется зубьями призматической формы с дополнительным воздействием на породу зубков полусферической формы, а при бурении крепких хрупких пород происходит комбинированное воздействие зубьев призматической формы и полусферических, причем при бурении в твердых пластичных породах эффективность разрушения их может быть меньше, чем долотами типа Т, а при бурении в крепких хрупких породах меньше, чем долотами типа К или ОК, но в целом при прохождении ряда чередующихся по крепости и пластичности пропластков скорость бурения и проходка на долото, как правило, превышают соответствующие показатели, получаемые при бурении как долотами типа Т, так и долотами типа К или ОК. Экспериментальные работы на буровом стенде при разбуривании блоков карельского гранита показали, что механическая скорость бурения долотами типа ТК даже в такой хрупкой и абразивной породе, как гранит, несколько выше, чем при бурении долотами типа ОК, хотя износостойкость вооружения этих долот, конечно, значительно уступает износостойкости вооружения последних.

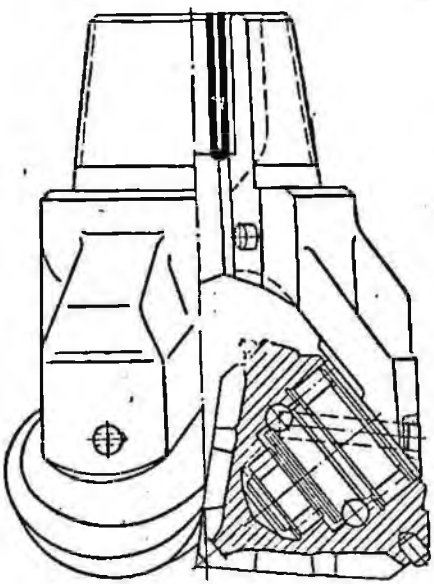


Рис. 50. Долото 21К-9ТК в разрезе.

Одновременно Куйбышевским долотным заводом была разработана, испытана и внедрена в серийное производство конструкция долота 21К-9ТК (рис. 50) диаметром 214 *мм* также с зубчатоштыревым вооружением. В этом долоте периферийные венцы на всех шарошках оснащены твердосплавными зубками, а вершина и средние венцы шарошек — стальными фрезерованными зубьями призматической формы. Такая схема вооружения обусловлена тем, что обычно при бурении в твердых и крепких породах у долот со стальными зубьями (типа Т) периферийные венцы изнашиваются значительно интенсивнее, чем зубья, расположенные ближе к вершине шарошки,

и долото теряет диаметр. Опора у долота 21К-9ТК такая же, как и у долот 8Н-214-ОК и 11Н-214-ТК.

На карьерах Балаклавского рудоуправления были проведены сравнительные испытания долот 8Н-214-ОК, 11Н-214-ТК и 21К-9ТК. Бурение велось на станках БСВ-2Е при осевой нагрузке на долото 11—13 *Т*, скорости вращения 88 *об/мин* и расходе воздуха 15—18 *м*³/*мин*.

Разбуриваемые породы были представлены в основном известняками крепостью 8—12 по шкале проф. М. М. Протодьяконова с пропластками твердой пластичной глины.

При проходке скважин фиксировалось время, затрачиваемое на бурение каждого метра скважины, с одновременной регистрацией параметров режима бурения.

Хронометражные наблюдения показали резкие колебания затрат времени на бурение 1 *м* скважины при постоянных параметрах режима бурения, что свидетельствует о большой неоднородности разбуриваемых пород. Это подтверждалось также наблюдением за выносимым шламом.

Рис. 51. Изменение механической скорости бурения для долот различных типов.

1 — долото 11Н-214-ТК; *2* — долото 8Н-214-ОК; *3* — долото 21К-9ТК.

Динамика изменения механической скорости бурения для всех трех типов долот оказалась различной (рис. 51). В начальный период наибольшая скорость бурения была у долот 21К-9ТК, затем по мере интенсивного износа стальных фрезерованных зубьев на средних венцах она резко падала и в конце бурения уже была наименьшей по сравнению с двумя другими типами долот. К этому времени износ стальных фрезерованных зубьев на средних венцах составил 80—90%. Несколько меньшей в начальный период была скорость у долот 11Н-214-ТК и еще меньшей у долот 8Н-214-ОК, хотя у последних она была наиболее стабильной и по сравнению с начальным и конечным периодами бурения изменилась незначительно. Начальный период бурения следует рассматривать с момента максимальной механической скорости (см. рис. 51), до этого момента для приработки долота бурение ведется на пониженных режимах.

Пометровый хронометраж показал, что наибольшее увеличение скорости бурения (до 2,5 раза) долотами типа ТК по сравнению с долотами типа ОК имеет место при проходке пропластков пластичных глин, т. е. где штыревое вооружение наименее эффективно. Наибольшая средняя проходка получена на долото 11Н-214-ТК.

В табл. 38 приведены данные о работе шарошечных долот трех типов на Кадыковском руднике Балаклавского рудоуправления.

Таблица 38

Шифр долота	Пробурено, м	Количество израсходованных долот	Средний проходка на долото, м	Время бурения, ч	Средняя механическая скорость бурения, м/ч
11П-214-ТК	2940	4	737.2	70	10.5
8П-214-ОК	3824	6	637.0	80	8.0
21К-9ТК	2348	14	167.6	17	10.0

Следует отметить, что, помимо несоответствия схемы вооружения физико-механическим свойствам разбуриваемых пород, отрицательным фактором в стойкости долот 21К-9ТК явилось то, что они были выполнены без продувочных отверстий в лапах. Это, несмотря на довольно значительный расход воздуха, все же способствовало перегреву опор и их зашламованию, что несколько снизило их потенциальную возможность. При бурении нефтяных и газовых скважин, где не требуется наличия продувочных каналов в лапах и где породы менее абразивны, долота 21К-9ТК дают удовлетворительные результаты.

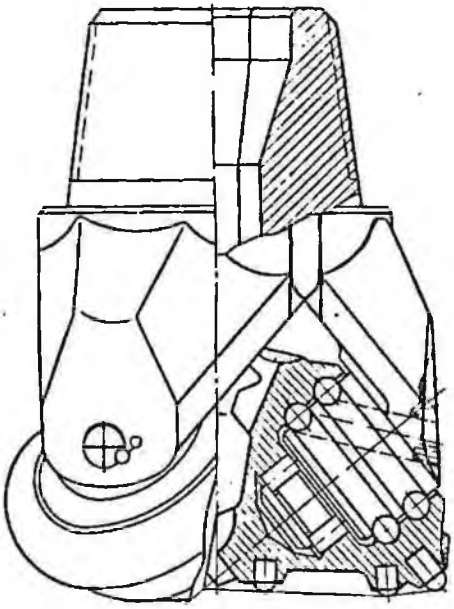


Рис. 52. Долото 2В-8ТК в разрезе.

Долота 7Н-190-ТК и 8Н-190-ТК (последние с расположением режущих кромок стальных фрезерованных зубьев перпендикулярно к образующей конуса шарошки) при бурении в перемежающихся по крепости породах также дали положительные результаты, превышающие в отдельных случаях показатели работы долот типов ОК и Т.

На ряде горнорудных предприятий применяются также другие конструкции долот типа ТК, выпускаемые серийно долотными заводами (в основном для бурения нефтяных скважин).

Долото 2В-8ТК (рис. 52) выпускается Верхне-Сергинским долотным заводом. Опора долота выполнена на трех подшипниках качения: двойной шариковый замок и концевой роликовый подшипник. Имеются каналы в лапах для продувки опор. Шарошки самоочища-

ющегося типа изготовлены с комбинированным на каждом венце вооружением в виде запрессованных твердосплавных зубков с полусферической формой рабочей поверхности диаметром 10 *мм*, чередующихся с фрезерованными из тела шарошек стальными зубьями призматической формы.

На периферийном венце и вершине первой шарошки стальные зубья выфрезерованы с направлением режущей кромки по образующей шарошки, а на периферийных венцах двух других шарошек и на средних венцах всех трех шарошек — перпендикулярно к образующей, причем на средних венцах ось поперечных зубьев (по окружности шарошки) не совпадает с осью твердосплавных зубков и имеет смещение в обе стороны ± 4 *мм*.

Дрогобычским долотным заводом осваивается выпуск долот У-243-ТКП, предназначенных для бурения скважин с продувкой воздухом. Опора в этих долотах выполняется по серийной схеме ролик — шарик — ролик со сверлением продувочных каналов в цапфах лап. Вооружение шарошек — фрезерованные зубья с направлением режущих кромок по образующей шарошки, чередующиеся с твердосплавными зубками диаметром 8 *мм* на вершине, диаметром 10 *мм* на средних венцах и диаметром 12 *мм* на периферийных венцах. Твердосплавные зубки формы 1СЦ.

Выпускаются также долота типа ТК диаметром 295 и 269 *мм*, схема вооружения которых аналогична долотам соответственно 2В-8ТК и У-243-ТКП. Однако эти долота до настоящего времени применялись лишь при бурении нефтегазовых скважин и в горнорудной промышленности практически не использовались.

Несмотря на полученные положительные результаты при бурении долотами типа ТК на ряде рудных месторождений, следует отметить, что они вряд ли найдут широкое промышленное применение при бурении взрывных скважин. Дело в том, что при сравнительно неглубоких скважинах (15—20 *м*) породы, как правило, монолитны, отсутствует частое чередование различных по крепости и абразивности пропластков, поэтому комбинированное вооружение шарошек в этом случае нецелесообразно. Часто применение этих долот для бурения взрывных скважин обусловливается отсутствием долот других, более соответствующих по вооружению типов — ОК или ТЗ.

Долота типа ТКЗ

Долота типа ТКЗ являются разновидностью долот типа ТК. У этих долот сохранен принцип чередования зубьев с полусферической и клиновой формами рабочих поверхностей. Отличительным признаком является лишь то, что клиновые зубья в долотах типа ТКЗ заменены твердосплавными зубками формы 3СЦ.

Во ВНИИБТ были разработаны две конструкции долот типа ТКЗ: 8Н-190-ТКЗ и 8Н-214-ТКЗ диаметром соответственно 190 и 214 *мм*. Опора в этих долотах была заимствована из конструкций долот типа ОК соответствующих диаметров.

Вооружение у долот 8Н-190-ТКЗ выполнено: на периферийных венцах из зубков 3СЦ диаметром 12 *мм*, чередующихся с зубками 1СЦ диаметром 10 *мм*, на остальных венцах диаметр зубков принят соответственно 10 и 8 *мм*.

У долот 8Н-214-ТКЗ (рис. 53) вооружение аналогично, т. е. на периферийных венцах запрессованы зубки большего диаметра, чем на венцах основного конуса шарошки, и зубки 3СЦ больше по диаметру, чем 1СЦ. Для предохранения долот от износа по диаметру обратные конусы шарошек армировались твердосплавными зубками типа 2СЦ.

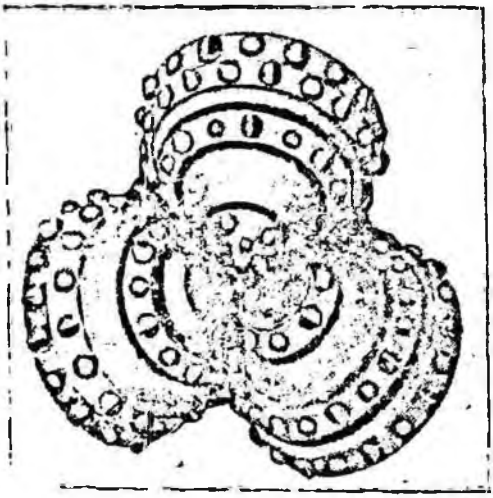


Рис. 53. Долото 8Н-214-ТКЗ, вид сверху.

Работоспособность долот 8Н-190-ТКЗ и 8Н-214-ТКЗ, изготовленных на экспериментальном заводе ВНИИБТ, проверялась в стендовых условиях при бурении блоков карельского гранита в сравнении с долотами типов ОК и ТК. Скорость бурения долотами типа ТКЗ, как и долотами типа ОК, в процессе бурения остается практически постоянной, но несколько большей, чем у последних. У долот типа ТК скорость бурения в первый период была такая же, как и у долот типа ТКЗ, но затем по мере износа фрезерованных зубьев интенсивно снижалась. По проходке на долото при бурении в граните долота типа ТКЗ значительно превосходили долота ТК и уступали долотам ОК.

В промышленных условиях долота типа ТКЗ испытывались на руднике Кальмакыр Алтын-Топканского комбината и руднике Аксай комбината «Кара-Тау».

В первом случае производилось бурение скважин глубиной 13 *м* в абразивных трещиноватых известняках и сиенито-диоритах, местами окварцованных с $f = 10 \div 12$ станками БСШ-2М при осевой нагрузке на долото 10—15 *Т*, скорости вращения долот 110—150 *об/мин* и расходе воздуха 10 $м^3/мин$.

Сопоставление показателей бурения производилось с долотами 8Б-190-К.

На руднике Аксай испытания производились при бурении скважин глубиной 20—24 *м* в абразивных окварцованных трещиноватых известняках с $f = 8 \div 12$ станками БСМ-2М при осевой нагрузке на долото 13—15 *Т*, скорости вращения долот 80—200 *об/мин* и рас-

ходе воздуха 10 *м*³/*мин*. Сопоставление производилось с долотами типов ТК, К и ОК, отработанных в тех же условиях.

Результаты испытания опытных долот типа ТКЗ в сравнении с серийными представлены в табл. 39.

Таблица 39

Предприятия	Шифр долота	Количество отработанных долот	Пробурено, м	Средняя проходка на долото, м	Средняя механическая скорость бурения, м/ч
Рудник Кальмакыр Алтын-Топканского комбината	8Н-190-ТКЗ	9	2121	236	13
	8В-190-К	17	2823	166	9
Рудник Аксай комбината «Кара-Тау»	8Н-190-ТКЗ	15	2919	195	16—20
	ЗВ-190-ТК	9	641	105	18—20
	5Н-190-ОК	165	3547	215	13—15
	8В-190-К	12	1538	128	10—11

Из табл. 39 видно, что на руднике Кальмакыр долота типа ТКЗ дают увеличение проходки и механической скорости бурения по сравнению с долотами типа К.

Результаты испытаний на руднике Аксай подтвердили это, а также показали, что по проходке на долото долота типа ТКЗ превосходят также долота ТК и уступают лишь долотам ОК, имея некоторые преимущества перед ними по механической скорости бурения, т. е. промышленные испытания полностью подтвердили результаты стендовых исследований.

Осмотр отработанных долот типа ТКЗ показал, что значительная часть их выходит из строя вследствие скола зубков 1СЦ, имеющих меньший по сравнению с зубками 3СЦ диаметр. Наибольшее количество сколотых зубков наблюдалось на периферийных венцах шарошек.

Кроме того, у большинства отработанных долот была большая качка вершин, образовавшаяся в результате износа концевого шарикового подшипника. Это явление часто приводило к зацеплению венцов соседних шарошек между собой, что также способствовало преждевременному выходу долот из строя.

С учетом указанных замечаний было сконструировано новое долото 9Н-190-ТКЗ (рис. 54), в котором зубки 1СЦ приняты такого же диаметра, как и зубки 3СЦ, т. е. диаметром 10 *мм* на венцах основного конуса и диаметром 12 *мм* на периферийных и лишь на вершине первой шарошки запрессованы зубки 1СЦ диаметром 8 *мм*.

Кроме того, во втором варианте конструкции этого долота концевой шариковый подшипник заменен опорой скольжения с запрессованными в шарошку втулкой и упорным подпятником. Это позволило усилить также периферийный роликовый подшипник за счет замены роликов 10 × 18 роликами 10 × 20. Введенные в опору изменения усилят ее, предотвратят интенсивное образование качки вершин

шарошек и, следовательно, возможное зацепление соседних венцов между собой.

Долота 8II-214-ТКЗ в промышленных условиях испытывались также на руднике Аксай комбината «Кара-Тау» и в тех же геологических условиях при осевой нагрузке на долото 14—15 *Т*, скорости вращения 80—150 *об/мин* и расходе воздуха 10—15 *м³/мин*.

По сравнению с долотами 4К-214-ТК (конструкция аналогична долоту 21К-9ТК) долота 8II-214-ТКЗ дали значительное увеличение средней проходки на долото при небольшом увеличении механической скорости бурения. Последнее объясняется тем, что у долот 4К-214-ТК вследствие истирания фрезерованных зубьев от абразивного воздействия породы механическая скорость быстро снижается, хотя в начальный период бурения она равняется скорости бурения долотами типа ТКЗ.

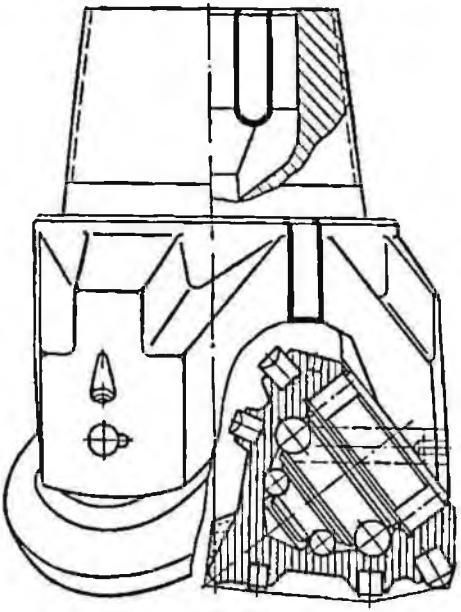


Рис. 54. Долото 9Н-190-ТКЗ в разрезе.

Осмотр отработанных долот 8Н-214-ТКЗ показал, что, как и у долот 8Н-190-ТКЗ, также наблюдается значительный скол зубков типа 1СЦ, особенно на периферийных венцах, что объясняется их меньшим по сравнению с зубками 3СЦ диаметром при одинаковой с ними величине вылета над телом шарошки. Очевидно, что как и у долот диаметром 190 *мм*, вооружение долот типа ТКЗ диаметром 214 *мм* должно быть пересмотрено.

Проведенные стендовые и промышленные испытания долот типа ТКЗ подтвердили их работоспособность при бурении взрывных скважин в породах с коэффициентом крепости до 12. Усиление вооружения на счет применения зубков 1СЦ большего диаметра безусловно увеличит стойкость долот и позволит использовать их в более крепких породах. Имея по сравнению с долотами типа ТК более агрессивное вооружение, они более стойки к абразивному износу, одновременно обеспечивая несколько бблыпую по сравнению с долотами типов К и ОК механическую скорость бурения. В самых крепких породах с коэффициентом крепости более 14—16 долота ТКЗ будут уступать по стойкости вооружения долотам ОК, так как у последних меньший вылет зубков над телом шарошки и, следовательно, меньшая вероятность их скола. Уменьшение вылета зубков 3СЦ имеет определенные пределы, ограничивающиеся высотой клина.

Глава VIII

ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН ШАРОШЕЧНЫМИ ДОЛОТАМИ

Эффективность работы шарошечных долот принято определять тремя основными техническими показателями:

— проходкой на долото в метрах, под которой подразумевается пробуренный долотом объем до выхода его из строя;

— стойкостью долота, т. е. продолжительностью работы долота в часах до выхода его из строя;

— механической скоростью бурения (в *м/ч*).

Бурение шарошечным долотом весьма сложный процесс и является совокупностью двух основных процессов:

— разрушения горной породы шарошечным долотом;

— удаления продуктов разрушения (выбуренной породы) из зоны забоя и ствола скважины.

Процесс разрушения горной породы шарошечным долотом определяется сочетанием ряда факторов, основными из которых являются: физико-механические свойства буримых горных пород; тип, конструкция, качество изготовления шарошечного долота; технологические параметры режима бурения.

Под технологическими параметрами режима бурения принято понимать:

— осевую нагрузку на шарошечное долото в тоннах или удельную осевую нагрузку на единицу диаметра долота (забоя);

— скорость вращения долота в минуту;

— род, количество и свойства рабочего агента для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы.

При этом первые два параметра режима бурения в значительной мере определяют эффективность процесса разрушения породы при бурении шарошечным долотом, а последний обеспечивает эффективность удаления из зоны забоя и ствола скважины выбуренной породы, а также способствует повышению износостойкости долота.

В свою очередь эффективность очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы определяется также конструкцией, геометрическими размерами, относительным расположением в шарошечном долоте промывочных (продувочных) устройств, параметрами

истечения из них рабочего агента, параметрами движения рабочего агента в забойной зоне и затрубном пространстве и его транспортирующей способностью.

В связи с этим рассмотрим существующие представления о влиянии каждого из технологических параметров режима бурения на технические показатели работы шарошечных долот.

§ 1. Влияние рабочего агента на показатели работы шарошечных долот

В качестве рабочего агента для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы при бурении взрывных скважин шарошечными долотами применяются: техническая вода (на подземных горных работах); сжатый воздух и воздушноводяная смесь (на открытых горных работах).

Влияние расхода жидкого рабочего агента (технической воды) на показатели работы шарошечных долот

Изучение опытных данных роторного бурения и бурения электробуром (сплошным забоем), а также колонкового бурения (с отбором керна) с промывкой забоя жидкими агентами, проведенное рядом исследователей [13, 34 и др.], показывает, что увеличение расхода промывочного агента приводит к росту механической скорости бурения до определенного предела, выше которого дальнейшее увеличение расхода промывочного агента не дает сколько-нибудь существенного возрастания механической скорости бурения. По В. С. Федорову [34] достаточным для эффективной очистки забоя и ствола скважины является такой расход, который обеспечивает удельный расход до 0,057—0,065 *л/сек/см*^{2}, т. е. скорости восходящего потока в затрубном пространстве, равные 0,57—0,65 *м/сек*.

К аналогичным выводам приходит и ряд других исследователей. Б. И. Воздвиженский и А. Л. Скорняков [14] указывают, что скорость восходящего потока воды в скважине для выноса самого крупного шлама при бурении шарошечными долотами должна быть не менее 0,8—1,0 *м/сек*.

Эти данные получены при бурении скважин диаметром 190—295 *мм*. Однако для подземных горных работ наиболее характерны скважины диаметрами менее 190 *мм* и даже 145 *мм*.

В связи с этим нами [1, 4, 5] проведены экспериментальные исследования по определению достаточного расхода воды для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы при бурении шарошечными долотами типа ОК диаметром 76, 97 и 112 *мм* в крепких и особо крепких горных породах.

Для этого на стенде-станке ЗИФ-1200А в блоках лезниковского гранита и лабродорита бурились скважины глубиной 0,8—1,0 *м* долотами диаметром 76 и 97 *мм* на штангах диаметром 50 и 63,5 *мм* и долотами диаметром 112 *мм* на штангах диаметром 63,5 *мм*.

В промышленных условиях аналогичные эксперименты проводились при бурении вертикальных и наклонных нисходящих скважин (до 70° к горизонтам) глубиной до 70 *м* в граносиенитах долотами диаметром 76 и 97 *мм* на штангах диаметром 50 *мм* с замками диаметром 63,5 *мм* (бурение осуществлялось с помощью буровых станков ЗИФ-300М на строительстве Красноярской гидроэлектростанции).

В качестве критерия достаточности расхода воды для очистки забоя и ствола скважины принималась механическая скорость бурения.

Достаточным для безусловной очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы считался такой расход воды или другого рабочего агента, дальнейшее увеличение которого не приводит к росту механической скорости бурения, а уменьшение которого влечет за собой снижение механической скорости бурения.

Достаточность расхода воды для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы определялась при максимальных для каждого размера долота величинах скоростей вращения долота и осевых нагрузок на долото.

Эти эксперименты показывают, что при бурении долотами диаметром 76 и 97 *мм* на штангах диаметром 50 и 63,5 *мм* и долотами диаметром 112 *мм* на штангах диаметром 63,5 *мм* механическая скорость бурения практически не изменяется с уменьшением расхода воды:

— от 240 *л/мин* до 120 *л/мин* для долот диаметром 112 *мм* при скорости вращения долота 346 *об/мин* и осевой нагрузке 7,4 *Т*;

— от 200 *л/мин* до 120 *л/мин* для долот диаметром 97 *мм* при скорости вращения долота 346 *об/мин* и осевой нагрузке 6,4 *Т*;

— от 200 *л/мин* до 80 *л/мин* для долот диаметром 76 *мм* при скорости вращения долота 346 *об/мин* и осевой нагрузке 5,0 *Т*.

При этом скорость восходящего потока воды в затрубном пространстве составила 0,4—0,6 *м/сек*.

В результате проведенных нами в стендовых и промышленных условиях экспериментов следует считать достаточным расход воды 120 *л/мин* при бурении долотами типа ОК диаметром 76, 97 и 112 *мм* со штангами диаметром 63,5 *мм* в крепких и особо крепких горных породах для безусловной очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы.

При этом следует отметить, что указанный расход воды имеет, несомненно, некоторый резерв, так как даже при снижении расхода до 80 *л/мин* (бурение долотами диаметром 76 *мм*) нами не было получено снижения механической скорости бурения.

Следует также отметить, что снижение скорости восходящего потока воды в затрубном кольцевом пространстве скважины до 0,3—0,38 *м/сек*, а удельного расхода до 0,03—0,38 *л/сек/см*^{2} не привело к снижению механической скорости бурения.

Экспериментальные исследования по определению влияния расхода воды на показатели работы шарошечных долот 6-6вК

производились нами при бурении нисходящих взрывных скважин глубиной до 50 *м* на руднике им. 40-летия ВЛКСМ Лениногорского полиметаллического комбината.

Бурение осуществлялось в микрокварцитах с помощью станков СБ-4 на беззамковых штангах диаметром 89 *мм*.

Эти исследования показали, что увеличение расхода воды от 80 до 200 *л/мин* приводит к росту механической скорости бурения в 1,5 раза, который сопровождается одновременным ростом проходки на долото на 25—40%. При дальнейшем увеличении расхода воды рост механической скорости бурения и проходки на долото стабилизируется.

Таблица 40

Диаметр долота, *мм*	Диаметр буровых штанг (труб), *мм*	Расход воды, *л/мин*
76	60.5	60
97	73.0	60
112	89.0	120
145	89.0—114.0	200

Примечание. Диаметр буровых штанг (труб) указан максимальный: для штанг (труб) с замковыми соединениями — наружный диаметр замков; для беззамковых штанг (труб) — наружный диаметр высаженных концов.

В табл. 40 приведены рекомендуемые «Временной инструкцией по эксплуатации шарошечных долот для бурения взрывных и других скважин в горной промышленности и при строительстве инженерных сооружений» (1964 г.), разработанной во ВНИИБТ с участием авторов, минимально допустимые расходы воды при бурении скважин шарошечными долотами диаметром 76—145 *мм*.

Бурение с расходом воды менее максимально допустимого ведет к неудовлетворительной очистке забоя скважины от выбуренной породы, ее многократному перезмельчению, неудовлетворительному охлаждению долота, зашламлению опор шарошек и как следствие к преждевременному выходу долота из строя и снижению механической скорости бурения.

Влияние расхода сжатого воздуха на показатели работы шарошечных долот

Расход сжатого воздуха при бурении шарошечными долотами является одним из важнейших параметров режима бурения. Функции сжатого воздуха, подводимого через долото к забою, не ограничиваются только транспортом выбуренных частиц породы по стволу

скважины, но включают в себя очистку забоя скважины, а также охлаждение элементов конструкции шарошечного долота в процессе бурения (узла опор, рабочих поверхностей шарошек), предотвращение попадания в полость опор шарошек бурового шлама. Кроме того, сжатый воздух может служить носителем распыленного в нем масла для смазки опор шарошек в процессе работы долота.

Ряд отечественных и зарубежных исследователей предлагает различные методы определения необходимого для эффективного бурения расхода сжатого воздуха [29, 35, 56, 58, 64]. Однако этот необходимый расход сжатого воздуха определяется ими только из условия транспортирования выбуренной породы по кольцевому затрубному пространству без оценки и учета необходимости обеспечения совершенной очистки забоя и призабойной зоны скважины, необходимости охлаждения долота и его элементов в процессе бурения и предотвращения запламления полости опор шарошек.

Между тем анализ результатов отработки, характера износа и причин выхода шарошечных долот из строя при бурении взрывных скважин на карьерах показывает, что основной причиной выхода шарошечных долот из строя и значительного снижения показателей их работы являются неудовлетворительная очистка забоя скважины, постоянное наличие на поверхности забоя и в призабойной зоне бурового шлама, следствием чего является интенсивный абразивный износ обратных конусов шарошек, козырьков и спинок лап до обнажения и выпадения тел качения периферийных роликовых подшипников, запламление опор и последующее заклинивание шарошек.

Недостаточность подсчитанного по различным методам расхода сжатого воздуха (из условий транспорта выбуренных частиц породы по затрубному кольцевому пространству скважины) приводит также к неудовлетворительному охлаждению в первую очередь элементов опор шарошек, вследствие чего последние перегреваются и заклиниваются.

Исследования, проведенные Ю. С. Лопатиным, авторами настоящей книги, А. Т. Лактионовым и другими, показывают, что даже при скоростях движения восходящего потока воздуха в кольцевом затрубном пространстве скважины, превышающих в 1,5—3,0 раза рекомендуемые значения, забой не очищается от выбуренной породы, что приводит к преждевременному выходу долота из строя вследствие проникновения шлама в полость опор шарошек и их последующему заклиниванию из-за интенсивного износа элементов долота [5, 6, 21].

По данным Б. Н. Кутузова и др. [17, 30] увеличение номинальной производительности компрессоров с 13 до 31 $м^3/мин$ при бурении долотами 8Н-214-ОК в известняках приводит к росту механической скорости бурения в среднем на 90% и сопровождается ростом крупности частиц выбуренной породы. При этом скорость движения воздуха в затрубном кольцевом пространстве изменялась в диапазоне 24—57 *м/сек*, т. е. была в 1,2—2,85 раза выше рекомендуемой.

Исследования, проведенные М. И. Кулачком [16], показали, что увеличение расхода сжатого воздуха от 10 *м³/мин* до 19 *м³/мин* при бурении долотами 8В-190К в диоритах с $f = 14$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова способствует интенсивному росту механической скорости бурения (почти до 2 раз).

Эксперименты, проведенные авторами, показали, что увеличение фактического расхода сжатого воздуха от 8 до 13—15 *м³/мин* при бурении долотами диаметром 190 *мм* приводит к увеличению механической скорости бурения на 25—36% и росту проходки на долото на 41—55%, однако полностью не устраняет износа козырьков и спинок лап и заклинивания шарошек из-за зашламления опор.

Темп роста проходки на долото и механическая скорость бурения при этом не снижаются, что свидетельствует о возможности дальнейшего улучшения показателей работы шарошечных долот за счет дальнейшего увеличения расхода подводимого к долоту сжатого воздуха.

В 1966. г. сотрудником ВНИИБТ Г. М. Осиповым на Аксайском руднике комбината «Кара-Тау» проведены исследования влияния расхода сжатого воздуха на механическую скорость бурения долотами 7И-190-ОКП, 2Н-190-ТЗ и 1В-190-Т в породах с коэффициентом крепости $f = 6 \div 8$, $f = 8 \div 10$ и $f = 10 \div 12$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова. Расход сжатого воздуха изменялся в диапазоне от 4 до 22 *м³/мин*.

Как показали эти исследования, в породах с $f = 10 \div 12$ для всех указанных конструкций долот механическая скорость бурения значительно возрастала при $Q \approx 16 \div 17$ *м³/мин*, при дальнейшем увеличении расхода сжатого воздуха величина механической скорости бурения практически стабилизировалась.

В породах с $f = 6 \div 8$ и $f = 8 \div 10$ увеличение расхода сжатого воздуха сопровождалось непрерывным интенсивным ростом механической скорости бурения.

Суммарная производительность компрессоров, смонтированных на шасси современных отечественных буровых станков для бурения шарошечными долотами, определялась по существующим методам расчета необходимого расхода сжатого воздуха, т. е. из условия транспортирования частиц выбуренной породы по затрубному кольцевому пространству скважины.

При анализе всех приведенных выше данных, а также технических характеристик буровых станков становится очевидной явная недостаточность производительности компрессоров, которыми оборудованы буровые станки отечественных конструкций, для обеспечения совершенной очистки забоя скважины от выбуренной породы, а также предотвращения зашламления опор шарошек и обеспечения интенсивного охлаждения элементов долот в процессе бурения, что вполне естественно приводит к значительному снижению показателей работы шарошечных долот.

Яркой иллюстрацией к сказанному могут служить технические характеристики буровых станков, изготовляемых серийно различными зарубежными фирмами.

Для повышения показателей работы шарошечных долот за счет обеспечения совершенной очистки забоя скважины, безусловного предотвращения запламления опор шарошек и охлаждения долота в процессе бурения ВНИИБТ на основании проведенных исследований рекомендует обеспечивать расход сжатого воздуха в соответствии с табл. 41.

Таблица 41

Диаметр долота, мм	Диаметр буровых штанг, мм	Рекомендуемый расход сжатого воздуха, м³/мин
76	63.5	4—5
97	73	5
112	89	5
145	89—114	10
190	150	15
214	180	18
243	194	27
269	219	40
295	245	50

Примечание. Диаметр буровых штанг (труб) указан максимальный: для штанг (труб) с замковыми соединениями — наружный диаметр замка; для штанг (труб) беззамковых — наружный диаметр высаженных концов.

Влияние состава рабочего агента на показатели работы шарошечных долот

Многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей показывают, что при бурении глубоких разведочных и эксплуатационных скважин на нефть, газ, термальные и минеральные воды, жидкие полезные ископаемые, при бурении геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые, а также при бурении сейсмических, структурно-поисковых и других скважин применение в качестве рабочего агента воды дает существенное увеличение механической скорости бурения и проходки на долото по сравнению с применением глинистого раствора [13, 29, 34, 42, 52, 58 и др.].

В настоящее время исследования ряда отечественных и зарубежных авторов также убедительно показывают преимущества бурения с продувкой сжатым воздухом по сравнению с бурением с промывкой водой [21, 22, 29, 35, 36, 42, 56, 64, 65].

Однако при бурении взрывных скважин невозможно применение в одних и тех же условиях в качестве рабочего агента для очистки забоя и ствола скважины сжатого воздуха или технической воды.

Исключение составляет бурение взрывных скважин на открытых горных работах, где в качестве рабочего агента может применяться сжатый воздух или воздушноводяная смесь.

При этом применение сжатого воздуха в качестве рабочего агента допускается только при условии наличия на буровом станке эффективной системы сухого пылеподавления или пылеулавливания. Из-за отсутствия таких систем применяется воздушноводяная смесь.

Однако существенным недостатком применения в качестве рабочего агента воздушноводяной смеси является снижение показателей работы шарошечных долот. В 1965—1966 гг. на ряде горных предприятий страны (комбинат «Кара-Тау», Алтын-Топканский комбинат) авторами проведены наблюдения за отработкой долот при применении в качестве рабочего агента сжатого воздуха и воздушноводяной смеси. В табл. 42 приведены показатели работы серийных шарошечных долот на руднике Аксай горнохимического комбината «Кара-Тау» при бурении с продувкой воздухом и воздушноводяной смесью.

Таблица 42

Шифр долота	Количество отработанных долот	Коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова	Род продувочного агента	Средняя проходка на долото, *м*	Средняя, механическая скорость бурения, *м/ч*
ОМ-21-190-Т	50	6—8	Воздух	215.2	12—15
ОМ-21-190-Т	22	6—8	Воздушноводяная смесь	182.0	10—12
5И-190-ОК	98	8—10	Воздух	244.3	9—12
5И-190-ОК	112	8—10	Воздушноводяная смесь	197.0	7—8

Бурение велось станками БСШ-1М при следующих параметрах режима бурения.

Осевая нагрузка на долото, *Т* . . . . . 13—15
Скорость вращения долота, *об/мин* . . . . . 100—150
Расход сжатого воздуха, *м³/мин* 10

При бурении с продувкой воздушноводяной смесью в поток воздуха добавлялось до 20 *л/мин* воды.

Долота каждой группы отрабатывались на участках, сложенных одинаковыми породами.

Как видно из табл. 42, при применении воздушноводяной смеси средняя проходка на долото снижалась на 18—24%, а механическая скорость бурения на 24—28% по сравнению с бурением с продувкой воздухом.

Аналогичные данные получены и по другим предприятиям.

Анализ причин снижения показателей работы шарошечных долот при применении воздушноводяной смеси показал, что основными причинами являются:

— интенсификация абразивного износа элементов долот, главным образом обратных конусов шарошек, козырьков и спинок лап

до обнажения и выпадения тел качения периферийных подшипников из-за «мокрого» трения;

— ухудшение очистки скважины из-за налипания на шарошки и внутреннюю поверхность лап частиц выбуренной породы и образования сальников на долотах;

— зашламление скважин при прекращении продувки: перед наращиванием очередной штанги или подъемом инструмента из скважины прекращается подача сжатого воздуха в скважину, в результате чего жидкий буровой шлам, скопившийся на поверхности у устья скважины, стекает в скважину, заполняет призабойную зону и, поднимаясь по центральному продувочному каналу в долоте, затекает в продувочные каналы в лапах и цапфах долота, препятствуя поступлению по ним в полость опор шарошек сжатого воздуха, в результате чего опоры зашламляются, перегреваются, а долото преждевременно выходит из строя.

Таким образом, отказ от применения в качестве рабочего агента для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы воздушноводяной смеси в значительной степени предопределяет рост показателей работы шарошечных долот.

Опыт комбинатов Ураласбест и «Кара-Тау», Докучаевского флюсодоломитного комбината, Балаклавского рудоуправления, Алтын-Топканского комбината и других предприятий убедительно свидетельствует о преимуществах применения для продувки сжатого воздуха по сравнению с применением воздушноводяной смеси.

§ 2. О влиянии продолжительности работы шарошечных долот на текущее значение механической скорости бурения в крепких и особо крепких абразивных породах

Эффект разрушения пород при бурении шарошечными долотами обусловливается взаимодействием вооружения шарошек с породой забоя. Разрушая горную породу, вооружение шарошек буровых долот одновременно изнашивается вследствие взаимодействия с буримой породой.

Многие исследователи указывают на то, что причиной выхода большинства шарошечных долот из строя является износ элементов опор (до 80% от общего количества изготовляемых отечественными заводами), т. е. стойкость вооружения шарошек буровых долот в настоящее время превосходит стойкость их опор [34]. Однако даже незначительный износ вооружения шарошек оказывает существенное влияние на эффективность процесса разрушения горных пород при бурении, так как вследствие износа вооружения резко увеличиваются контактные поверхности зубьев, снижаются контактные давления и дальнейшее разрушение породы происходит в режиме поверхностного истирания.

Ряд исследований, посвященных изучению износа вооружения шарошек буровых долот и способам его снижения [24, 25, 28, 34, 40 и др.], показывает, что основными причинами разрушения зубьев

шарошек является повторно-переменный изгиб зубьев у их основания (в заделке) в сочетании с ударной нагрузкой и абразивным износом (вследствие проскальзывания зубьев в процессе бурения). Это приводит к появлению усталостных трещин, выкрашиванию армированного слоя, смятию и поломкам зубьев, к прогрессивному износу, потере первоначальной геометрической формы зубьев, дополняет и ускоряет развитие остальных видов износа, снижает механическую скорость бурения в процессе отработки долота.

На рис. 55 [28] показано изменение механической скорости бурения от времени работы серийных долот 1В-6аС диаметром 140 *мм* в лезниковском граните при осевой нагрузке на долото 8 *Т* и скоростях вращения долот 358 *об/мин* (кривая *1*) и 69 *об/мин* (кривая *2*).

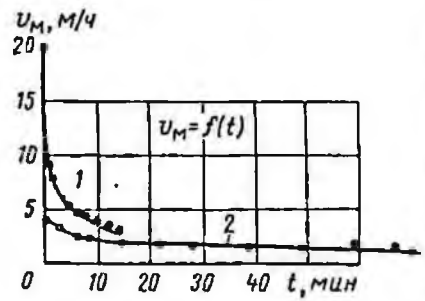


Рис. 55. Изменение механической скорости бурения во времени.

Анализируя характер кривых, приведенных на рис. 55, можно отметить интенсивное снижение механической скорости бурения в течение начального периода работы долота и ее дальнейшую стабилизацию на протяжении последующего периода работы долота до его полного выхода из строя.

В первой зоне разрушение породы происходит объемно, хотя эффективность разрушения снижается по мере износа зубьев и потери ими первоначальной формы.

Вторая зона характеризуется явной недостаточностью контактных давлений для эффективного разрушения породы вследствие износа зубьев и резкого увеличения их контактных поверхностей. В этой зоне разрушение породы происходит в режиме поверхностного истирания.

Такой вид кривых $v_{мех} = f(t)$ характерен для бурения шарошечными долотами с зубчатым вооружением, выфрезерованным из тела шарошек, в абразивных породах и подтверждается результатами многочисленных исследований, проведенных в стендовых и промышленных условиях в СССР и за рубежом.

Для увеличения механической скорости бурения зубчатыми шарошечными долотами ряд авторов [22, 34] рекомендует по мере износа вооружения шарошек увеличить осевые нагрузки на долота или скорость вращения долот, что позволит увеличить среднюю механическую скорость бурения.

Ряд исследователей [22, 34] представляет зависимость механической скорости бурения зубчатыми долотами от времени бурения в виде формулы

$$v_{мех\,t} = v_{0\,мех}\, e^{-at}, \qquad \text{(VIII.1)}$$

где $v_{мех\,t}$ — текущее значение механической скорости бурения, изменяющееся во времени в *м/ч*; $v_{0\,мех}$ — начальная механическая

скорость бурения в *м/ч*; α — коэффициент износа вооружения шарошек, представляющий собой логарифмический декремент убывания механической скорости бурения, равный времени, в течение которого $v_{мех\,t}$ уменьшается в e раз (e — основание натуральных логарифмов).

Как показывают исследования авторов [34, 38], эта формула справедлива только для бурения зубчатыми долотами в малоабразивных породах средней твердости, в которых по мере износа вооружения вследствие уменьшения контактного давления режим разрушения постепенно от эффективного объемного переходит к усталостному, а затем и к поверхностному истиранию.

Исследования, проведенные в СССР и за рубежом, показывают, что при бурении шарошечными долотами со штыревым вооружением в виде твердосплавных зубков, имеющих полусферическую форму рабочих поверхностей, механическая скорость бурения практически не изменяется на протяжении всей отработки долот в однородных породах при постоянных режимах бурения [4, 5, 25, 44 и др.].

Исследованиями показано, что при бурении в хрупких и пластично-хрупких породах шарошечными долотами со штыревым вооружением даже в виде стальных выфрезерованных из тела шарошек зубьев с полусферической формой рабочих поверхностей при износе вооружения на 80—85% снижение механической скорости бурения на протяжении всей отработки долот не превышает 25—30%.

Справедливость приведенных данных подтверждается работами ряда авторов [24, 25, 37, 48, 52 и др.] по выбору наиболее износостойких форм рабочих поверхностей зубьев шарошечных долот для бурения в абразивных хрупких и пластично-хрупких породах, а также результатами наших исследований.

В процессе проведения исследований [4, 5] производились непрерывные хронометражные наблюдения за отработкой всех шарошечных долот типа ОК диаметрами 76, 97 и 112 *мм*. Всего хронометражными наблюдениями охвачено около 250 шарошечных долот типа ОК указанных размеров или более 5000 *м* бурения. По этим данным построены графики $v_{т.\,мех} = f(t)$, представленные на рис. 56.

Анализируя приведенные на указанных графиках кривые зависимости механической скорости бурения долотами шести конструкций диаметром 76, 97 и 112 *мм* типа ОК в крепких и особо крепких абразивных породах от времени, можно заметить, что в исследованном диапазоне параметров режима бурения и буримых горных породах механическая скорость бурения практически не зависит от времени работы шарошечного долота на забое (до выхода его из строя).

Это положение справедливо для всех конструкций шарошечных долот типа ОК диаметром 76, 97 и 112 *мм*.

На рис. 57 представлены данные механического каротажа по некоторым скважинам глубиной до 70 *м*, пробуренным в граносиените долотами 4Н-76-ОК с промывкой водой (станки 3ПФ-300М).

На рис. 57 видно, что при бурении в монолитных однородных особо крепких абразивных породах до глубины 70 *м* механическая скорость бурения долотами типа ОК малых диаметров также практически не изменяется.

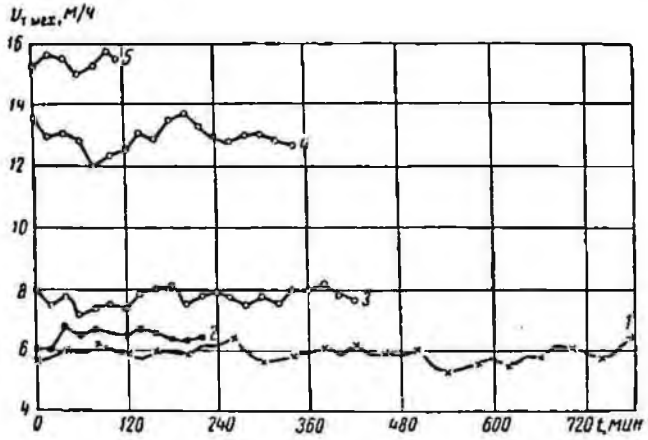


Рис. 56. Зависимость текущего значения механической скорости бурения от времени работы долот 2Н-76-ОК, 4Н-76-ОК, 3Н-112-ОК.

1 — долото 4Н-76-ОК № 2; гранодиорит, $n = 120$ об/мин, $P_{об} = 2{,}5$ *Т*, $Q = 9$ м³/мин; *2* — долото 2Н-76-ОК № 10, гранодиорит, $n = 140$ об/мин, $P_{об} = 2{,}5$ *Т*, $Q = 9$ м³/мин; *3* — долото 3Н-112-ОК № 2, габбро, $n = 120$ об/мин, $P_{об} = 5$ *Т*, $Q = 9$ м³/мин; *4* — долото 3Н-112-ОК № 5, габбро, $n = 120$ об/мин, $P_{об} = 7$ *Т*, $Q = 9$ м³/мин; *5* — долото 4Н-76-ОК № 11, гранодиорит, $n = 120$ об/мин, $P_{об} = 5$ *Т*, $Q = 9$ м³/мин.

Аналогичные результаты получены во ВНИИБТ при отработке долот типов К и ОК диаметрами 145, 190, 214 и 243 *мм* в абразивных

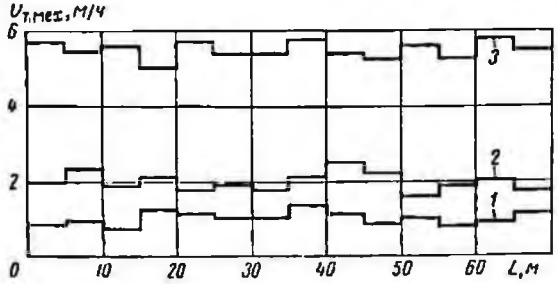


Рис. 57. Зависимость текущего значения механической скорости бурения в граносиените долотом 4П-76-ОК от глубины скважины, $Q = 120$ *л/мин*.

1 — скв. 27-2В, $n = 102$ об/мин, $P_{об} = 3Т$; *2* — скв. 11-4Н, $n = 182$ об/мин, $P_{об} = 3$ *Т*; *3* — скв. 20-3В, $n = 182$ об/мин, $P_{об} = 5$ *Т*.

хрупких крепких и особо крепких породах, а также при бурении долотами типа ТЗ диаметрами 145, 190, 214 и 243 *мм* в абразивных твердых вязких породах на Алтын-Топканском, Оленегорском, Доку-

чаевском, Зыряновском и Ждановском комбинатах, на Запорожском и Балаклавском рудоуправлениях и других предприятиях.

Наши эксперименты подтверждают выводы ряда отечественных и зарубежных авторов о постоянстве механической скорости бурения штыревыми шарошечными долотами, полученные ими на ограниченном экспериментальном материале [24, 25, 28, 37 и др.].

Таким образом, для долот типа ОК при бурении в крепких и особо крепких хрупких абразивных породах, а также долот типа ТЗ при бурении в абразивных твердых вязких породах понятие «начальная механическая скорость бурения» лишено какого-либо смысла, так как в течение всей отработки долот этих типов текущие значения механической скорости бурения при всех сочетаниях параметров режима бурения изменяются в некоторых весьма ограниченных пределах, средние значения которых практически остаются неизменными до выхода долот из строя в результате износа или заклинивания элементов опор шарошек, опережающих износ вооружения шарошек и тем самым определяющих продолжительность пребывания долота на забое.

§ 3. Влияние скорости вращения долота и осевой нагрузки на долото на механическую скорость бурения

Изучению влияния скорости вращения долота и осевой нагрузки на долото на механическую скорость бурения шарошечными долотами посвящено большое число работ ряда отечественных и зарубежных авторов.

Эти исследования были проведены при бурении шарошечными долотами различных конструкций, типов и размеров в горных породах, различных по своим физико-механическим свойствам.

Подавляющее большинство этих работ посвящено изучению указанных закономерностей при разбуривании осадочных и частично метаморфизованных пород, характерных для основных нефте- и газоносных провинций СССР и зарубежных стран. Как правило, такие исследования проведены для шарошечных долот диаметром 190 *мм* и более.

Некоторая, весьма небольшая часть исследований проведена для изучения влияния параметров режима бурения на механическую скорость бурения шарошечными долотами малых диаметров (97—145 *мм*) типов С и Т, серийно изготовляемыми долотными заводами, в породах средней твердости и твердых, а также частично долотами типа К диаметром 93 *мм* в крепких породах. В основном эти исследования проведены в стендовых условиях. Лишь в последние 2—3 года в весьма небольших объемах и ограниченном диапазоне изменения параметров режима бурения проведены исследования влияния скорости вращения долота и осевых нагрузок на долото на механическую скорость бурения штыревыми и полуштыревыми шарошечными долотами диаметром 190—295 *мм* при разбуривании

крепких абразивных пород, характерных для предприятий горной промышленности и смежных отраслей народного хозяйства.

Однако диапазон изменения параметров режима бурения при этих исследованиях в подавляющем большинстве случаев был весьма ограничен (скорости вращения шарошечных долот не превышали 60—200 *об/мин*), осевые нагрузки на долота ни в одних исследованиях не достигали предела прочности конструкций долот.

Большинство исследований, проведенных по различным методикам и в различных условиях, позволяет дать только качественную оценку закономерностей и в лучшем случае отметить общие тенденции этих закономерностей.

Анализ исследований зависимости механической скорости бурения от осевой нагрузки на долото

По результатам исследований в стендовых и промышленных условиях большинство авторов указывает, что зависимость механической скорости бурения от осевой нагрузки на долото имеет характер степенной функции.

При этом по данным различных исследователей показатели степени весьма отличны друг от друга.

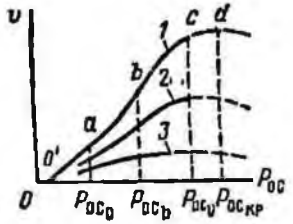


Рис. 58. Общий вид зависимости $v_{мех} = f(P_{oc})$ по В. С. Федорову.

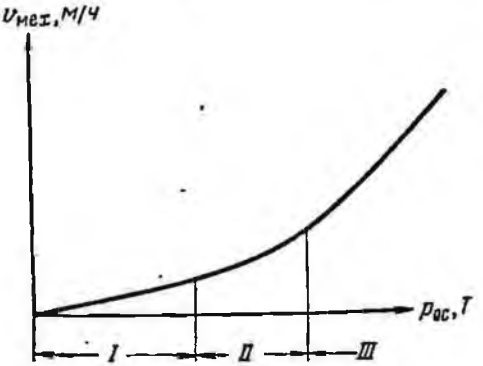


Рис. 59. Кривая зависимости механической скорости бурения от осевой нагрузки на долото (по Л. А. Шрейнеру и др.).

По В. С. Федорову [34] зависимость механической скорости бурения шарошечными долотами от осевой нагрузки на долото имеет общий характер, представленный на рис. 58. Автор различает три кривых, на которых кривая *1* соответствует совершенной очистке забоя от выбуренной породы, кривая *2* соответствует так называемому «нормальному» состоянию забоя, при котором зашламление забоя не превышает $^1/_6$ высоты самых низких зубьев шарошек, кривая *3* соответствует бурению при неудовлетворительной очистке забоя скважины.

На кривых В. С. Федоров отмечает ряд характерных [участков:

— при увеличении P_{oc} от 0 до P_{oc_0} (пока $\frac{P_{oc}}{F_t} \leqslant \sigma$) механическая скорость бурения возрастает прямо пропорционально увеличению P_{oc};

— дальнейшее увеличение осевой нагрузки от P_{oc_0} до P_{oc_1} приводит к росту механической скорости бурения пропорционально P_{oc} (для крепких пород $1{,}25 \leqslant y \leqslant 2{,}0$ при совершенной очистке забоя; при неудовлетворительной очистке забоя $y = 1$ или даже $y < 1$);

— при увеличении осевой нагрузки от P_{oc_1} до $P_{oc_{кр}}$ темп роста механической скорости бурения замедляется и становится меньше скорости приращения осевой нагрузки;

— при увеличении осевой нагрузки выше $P_{oc_{кр}}$ механическая скорость бурения сохраняется постоянной или снижается (последнее объясняется автором тем, что при полном погружении самих низких зубьев шарошек на всю их высоту дальнейшее увеличение осевой нагрузки не приводит к увеличению углубления зубьев в породу, а следовательно, и к росту механической скорости бурения).

При этом В. С. Федоров делает оговорку, что при бурении твердых и очень твердых пород предельное значение осевой нагрузки на долото определяется не особенностями разрушения пород, а механической прочностью элементов конструкции долот.

Более детальный анализ зависимости механической скорости бурения от осевой нагрузки на шарошечное долото [37, 38] показал, что процесс разрушения носит характер поверхностного истирания только в случае, когда контактные давления значительно ниже предела прочности породы (рис. 59, область *I*). При увеличении контактных давлений до некоторых значений, не достигающих, однако, предела прочности породы, процесс разрушения становится объемным и в области *II* носит усталостный характер, так как разрушение достигается только после многократного приложения нагрузки.

Наиболее эффективен процесс разрушения при достижении величин контактных давлений, равных пределу прочности породы или превышающих его. В этом случае (область *III*) механическая скорость бурения шарошечными долотами линейно возрастает с увеличением осевой нагрузки.

Таким образом, в отличие от В. С. Федорова Л. А. Шрейнер и другие отмечают только три характерных участка кривой $v_{мех} = f(P_{oc})$.

По-видимому, наличие максимума механической скорости бурения с увеличением осевой нагрузки выше $P_{oc_{кр}}$ (по В. С. Федорову) возможно только при бурении шарошечными долотами в весьма пластичных породах с низкими прочностными показателями, не дающими хрупкого разрушения.

При бурении мягкого сильно пористого известняка серийными долотами диаметром 140 *мм* Ю. Ф. Потаповым и В. В. Симоновым

[28] была получена экспериментальная кривая $v_{мех} = f(P_{oc})$, имеющая некоторую аналогию с зависимостью механической скорости бурения от осевой нагрузки на долото, приведенной В. С. Федоровым. Однако Ю. Ф. Потапов и В. В. Симонов указывают, что даже при глубине внедрения за один оборот долота на 6 *мм* (что превышает минимальную высоту зубьев 5,7 *мм*, расположенных на вершинах шарошек) ими не был получен максимум механической скорости бурения.

М. Е. Белашем и Е. А. Постниковым [9] при исследовании влияния осевой нагрузки на долото на механическую скорость бурения долотами 1В-4аС (диаметром 97 *мм*), 1В-5аС (диаметром 118 *мм*) и ДШ-10А (диаметром 150 *мм*) в породах с коэффициентом крепости от $f = 8 \div 10$ (мрамор) до $f = 18 \div 20$ (плотные микрокварциты) по шкале проф. М. М. Протодьяконова были получены кривые, аналогичные по характеру приведенным кривым В. С. Федорова.

Однако, как видно из приводимых этими авторами данных, характер этих кривых объясняется недостаточно эффективной очисткой забоя от выбуренной породы, так как расход воды для очистки забоя от выбуренной породы составлял всего 35—60 *л/мин*.

Некоторую аналогию с кривыми В. С. Федорова имеют и зависимости, полученные А. Н. Лукьяновым и Г. С. Филипповым [33] при исследовании работы долот типов К и ОК диаметрами 214—269 *мм* в крепких и очень крепких абразивных породах Ждановского и Оленегорского горнообогатительных комбинатов (рис. 60).

Анализ конструкций долот, работу которых исследовали А. Н. Лукьянов и Г. С. Филиппов, показал, что выполаживание кривых $v_{мех} = f(P_{oc})$ в области высоких (но не предельных) осевых нагрузок на долота объясняется в первую очередь неудовлетворительной очисткой забоя скважины от выбуренной породы, несовершенством конструкций вооружения шарошек, схемы и конструктивных решений продувочных устройств долот, вследствие чего плохо очищалась поверхность забоя скважины и шарошки «садились» на оставшиеся на забое буровой шлам и неровности поверхности забоя.

Другие исследователи [10, 28, 37, 47, 53] не подтверждают наличие IV зоны (по В. С. Федорову) кривых $v_{мех} = f(P_{oc})$. Это не подтверждается также результатами наших исследований, при которых достигались предельные осевые нагрузки на долота.

При проведении исследований нами был установлен экспериментально предел прочности конструкций шарошечных долот диаметром 76 и 97 *мм*: при осевых нагрузках, равных 7—7,5 T на долота диаметром 76 *мм* и 9—9,5 T на долота диаметром 97 *мм*, появляются трещины в теле шарошек, обламываются цапфы лап и т. п.

Исходя из этого были приняты коэффициент запаса прочности 1,4—1,5 и максимальные осевые нагрузки на долота диаметром 76 *мм*, равные 5,0 T, и на долота диаметром 97 *мм*, равные 6,0—6,4 T.

При осевых нагрузках до 9 *Т* разрушений долот ЗН-112-ОК не наблюдалось, превысить же эту нагрузку на долота ЗН-112-ОК не представилось возможным из-за ограниченных возможностей буровых станков ЗИФ-1200А и БТС-2.

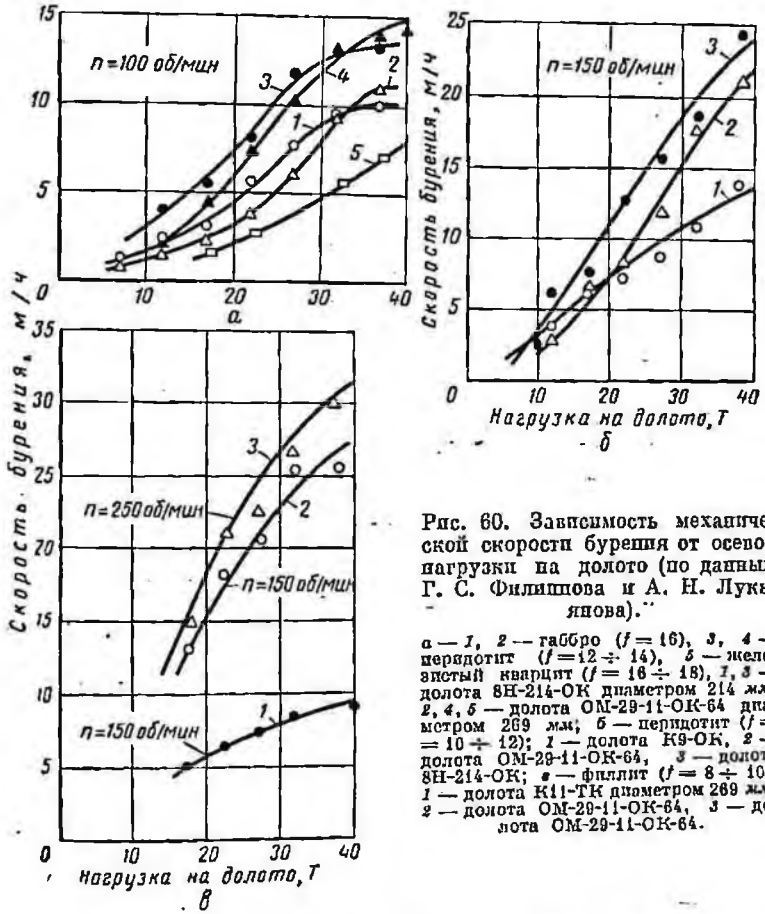


Рис. 60. Зависимость механической скорости бурения от осевой нагрузки на долото (по данным Г. С. Филиппова и А. Н. Лукьянова).

а — *1*, *2* — габбро ($f = 16$), *3*, *4* — перидотит ($f = 12 \div 14$), *5* — железистый кварцит ($f = 16 \div 18$), *1*, *3* — долота 8Н-214-ОК диаметром 214 *мм*, *2*, *4*, *5* — долота ОМ-29-11-ОК-64 диаметром 269 *мм*; *б* — перидотит ($f = 10 \div 12$); *1* — долота К9-ОК, *2* — долота ОМ-29-11-ОК-64, *3* — долота 8Н-214-ОК; *в* — филлит ($f = 8 \div 10$), *1* — долота К11-ТК диаметром 269 *мм*, *2* — долота ОМ-29-11-ОК-64, *3* — долота ОМ-29-11-ОК-64.

Исследования зависимости $v_{мех} = f(P_{oc})$ для долот типа ОК различных конструкций диаметром 76, 97 и 112 *мм* проводились в диапазоне удельных давлений 0,13—0,66 *Т/см* на 1 *см* диаметра забоя, т. е. осевых нагрузках на долота диаметром 76 *мм* — 1,0—2,5—3,5—5,0 *Т*; на долота диаметром 97 *мм* — 1,2—3,2—4,5—6,4 *Т*; на долота диаметром 112 *мм* — 1,5—3,7—5,2—7,4—9 *Т*.

Каждое новое долото прирабатывалось в течение 10—15 *мин* при осевых нагрузках 0,5—1,0 *Т* (в зависимости от размера долота) и скорости вращения долота 67—102 *об/мин*, после чего каждое

долото отрабатывалось при постоянном для этого долота сочетании осевой нагрузки и скорости вращения до полного выхода из строя.

Расход воды (при бурении с промывкой) составлял 120 *л/мин*, расход воздуха (при бурении с продувкой) составлял 9 *м³/мин*.

Исследования в стендовых и промышленных условиях проводились при бурении в окварцованных, доломитизированных известняках, плотных сцементированных конгломератах, хлорито-серицито-кварцевых сланцах, фосфоритах, лезниковском граните, лабрадорите, габбро, гранодиорите, граносиените и других абразивных твердых, крепких и очень крепких породах.

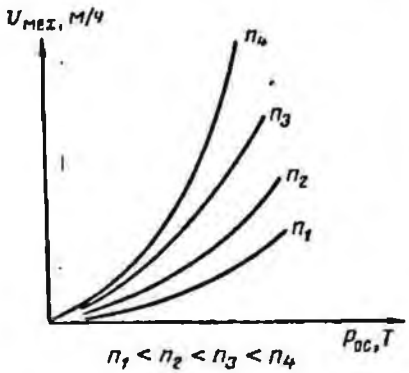


Рис. 61. Общий вид зависимости $v_{мех} = f(P_{ос})$ при бурении долотами 2Н-76-ОК, 4Н-76-ОК, 1Н-97-ОК (I и II варианта). 2Н-97-ОК и 3Н-112-ОК в лезниковском граните, лабрадорите, габбро, граносиените, гранодиорите и др.

На рис. 61 представлены в общем виде графические зависимости $v_{мех} = f(P_{ос})$ для долот 2Н-76-ОК, 4Н-76-ОК, 1Н-97-ОК, 2Н-97-ОК и 3Н-112-ОК при бурении в лезниковском граните, лабрадорите, габбро, граносиените и других породах.

Каждая кривая на рис. 61 соответствует постоянной скорости вращения долота. Семейство приведенных на рис. 61 кривых характеризует зависимость механической скорости бурения от осевой нагрузки на долото в широком диапазоне изменения скоростей вращения долот.

Как видно из приведенных на этом рисунке кривых, для всех указанных конструкций долот типа ОК диаметром 76, 97 и 112 *мм* в исследованных диапазонах изменения параметров режима бурения и буримых горных породах зависимости $v_{мех} = f(P_{ос})$ имеют вид степенных функций — парабол — и могут быть описаны общей эмпирической формулой

$$v_{мех} = aP_{ос}^{y} \ [м/ч], \qquad \text{(VIII.2)}$$

где a, y — безразмерные эмпирические величины;

$$1 < n \leqslant 2.$$

Каждая точка графика $v_{мех} = f(P_{ос})$ являлась средневзвешенной по результатам отработки при данном сочетании параметров режима бурения 2—5 долот одной и той же конструкции и размера. Коэффициенты вариации не превышали 3—10%.

Аналогичного вида кривые получены во ВНИИБТ при бурении долотами 7Н-190-ОКП в мелкокристаллических гранитах (Гнивański карьер и Запорожское карьероуправление), окремнелых доломитизированных известняках и вторичных кварцитах (Алтын-

Топканский комбинат, комбинат «Кара-Тау»), долотами 8Н-214-ОК, 243-ОКП при бурении в доломитизированных известняках и доломитах (Докучаевский комбинат), пегматитах, железистых кварцитах и гранитогнейсах (Оленегорский ГОК), долотами 1Н-190-Т3 и 2Н-214-Т3 в известняках (Алтын-Топканский комбинат, Балаклавское рудоуправление, комбинат «Кара-Тау»). Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований М. А. Гольда (Спбцветметнипроект), В. Д. Буткина [10, 11] и др.

Анализ результатов этих исследований показывает, что при бурении шарошечными долотами типов ОК и Т3 в исследованных диапазонах изменения параметров режима бурения средняя механическая скорость бурения в зависимости от осевой нагрузки на долото имеет вид степенной функции с показателем степени, большим единицы, но меньшим или равным двум. Этот вывод следует считать справедливым при условии совершенной очистки забоя скважины от выбуренной породы промывкой водой и продувкой воздухом.

Во всех исследованных нами случаях $v_{мех} = f(P_{ос})$ является непрерывно возрастающей функцией. Следовательно, при бурении долотами типа ОК и Т3 для увеличения эффективности разрушения пород целесообразно увеличение осевой нагрузки на долото до величин $P_{ос}$, обусловливаемых прочностью элементов конструкций этих долот.

На основании проведенных исследований и накопленного опыта бурения для долот типов ОК и Т3 рекомендуются следующие величины осевых нагрузок на долото (табл. 43).

Таблица 43

Диаметр шарошечного долота, мм	76	97	112	145	190	214	243	269	295
Осевая нагрузка на долото, T	4—5	6	9	12	18	22	28	32	40

Влияние скорости вращения долота на механическую скорость бурения

Технология бурения в настоящее время находится в стадии накопления опытных данных, и поэтому результаты исследований, проведенных различными авторами, справедливы только при определенных условиях, для определенного диапазона изменения параметров, с изменением которых влияние этих факторов на показатели бурения может изменяться.

В области бурения нефтяных и газовых разведочных и эксплуатационных скважин накоплен значительный материал и проведен ряд исследований по установлению влияния скорости вращения долота на механическую скорость бурения. Этот вопрос стал особенно

актуальным в связи с широким распространением высокооборотного турбинного бурения. Однако в последние годы в турбинном бурении наметилась тенденция к снижению скорости вращения долота. Это в значительной степени объясняется успехами роторного бурения в СССР и за рубежом, а также стремлением увеличить крутящий момент на валу турбобура за счет снижения скорости его вращения в связи с увеличением глубины бурения.

При бурении скважин малой глубины, например взрывных скважин в горной и других отраслях промышленности, также существуют две точки зрения на выбор скорости вращения шарошечных долот при бурении. Некоторые авторы считают целесообразным осуществлять бурение шарошечными долотами при высоких скоростях вращения долота от 300—600 до 1200 *об/мин* [23 и др.], другие считают, что скорость вращения долота должна быть в пределах 100—300 *об/мин* и даже 30—60 *об/мин* [1, 4, 6, 7, 10, 14, 17, 33].

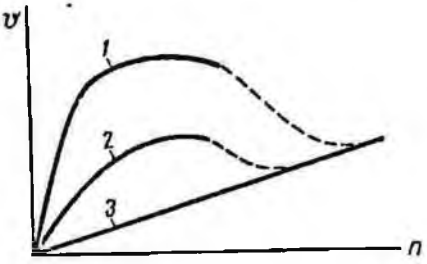


Рис. 62. Общий вид зависимости механической скорости бурения от скорости вращения долота (по В. С. Федорову).

Это объясняется сложностью процесса взаимодействия элементов вооружения шарошек с породой при бурении и недостаточной изученностью этих явлений.

На основании обработки экспериментальных данных, полученных в промысловых и стендовых условиях, В. С. Федоров установил общий вид зависимости $v_{мех} = f(n)$, иллюстрирующийся рис. 62 [34].

На этом рисунке кривые *1* и *2* соответствуют случаям бурения в области объемного разрушения (при этом $P_{ос_1} > P_{ос_2}$), кривая *3* — бурению в области поверхностного разрушения.

Анализируя характер проведенных на рис. 62 кривых, В. С. Федоров говорит о некотором критическом значении скорости вращения долота $n_к$, зависящем от ряда факторов, в частности от свойств буримых пород, конструкции вооружения шарошек и т. д.

При бурении в области объемного разрушения породы при $n < n_к$ механическая скорость бурения является возрастающей функцией скорости вращения долота; при $n > n_к$ $v_{мех} = f(n)$ — убывающая функция.

Такой характер зависимости $v_{мех} = f(n)$ хорошо подтверждается исследованиями ряда авторов [24, 39 и др.].

По данным [41] максимум $v_{мех} = f(n)$ соответствует скорости вращения долота около 160 *об/мин* для всех значений контактных нагрузок, превосходящих предел прочности породы, т. е. в области объемного разрушения породы. К выводу о нецелесообразности увеличения скорости вращения долота свыше 200—300 *об/мин* при бурении в некоторых очень пластичных или сильно пористых поро-

дах, не дающих хрупкого разрушения, приводят и другие авторы. Однако при бурении в хрупких и пластично-хрупких с небольшим коэффициентом пластичности горных породах максимум $v_{мех} = f(n)$ не был достигнут ни одним из исследователей, что дает основание предполагать, что максимум $v_{мех} = f(n)$ лежит в области скоростей вращения, превышающих 1000—1200 *об/мин*, т. е. $v_{мех} = f(n)$ — возрастающая функция в области 0—1200 *об/мин* [9, 24, 28, 34, 39, 38]. Эти исследования, а также исследования ряда других авторов [53, 59 и др.] показывают, что в указанном диапазоне скоростей вращения шарошечных долот $v_{мех} = f(n)$ — непрерывно возрастающая функция, однако с увеличением скорости вращения долота темп роста механической скорости бурения снижается, т. е. в функциональной зависимости $v_{мех} = f(n)$, описываемой многими авторами в виде степенной функции, показатель степени при n меньше единицы.

Некоторое кажущееся исключение составляют исследования по технологии беструбного электробурения [22] при скоростях вращения долота до 4500 *об/мин* и осевых нагрузках до 500 *кГ* на долота диаметром $3^3/_4''$, $4^3/_4''$, $5^3/_4''$, которыми установлена линейная зависимость $v_{мех}$ от скорости вращения долота. Анализ результатов этих исследований показывает, что полученная этими авторами линейная зависимость $v_{мех} = f(n)$ объясняется режимом поверхностного истирания, при котором решающее влияние на механическую скорость бурения оказывает количество актов взаимодействия вооружения шарошек с породой забоя скважины.

К сожалению, в настоящее время не представляется возможным проанализировать зависимости $v_{мех} = f(n)$, полученные рядом авторов [10, 11, 16, 17] при бурении взрывных скважин шарошечными долотами, так как практически все эти исследования проведены в весьма узком диапазоне изменения скоростей вращения долот (60—150 *об/мин*). В связи с этим ограничимся только рассмотрением зависимостей $v_{мех} = f(n)$, полученных автором [4] при исследовании работы долот типа ОК диаметрами 76, 97 и 112 *мм* при бурении в абразивных крепких и очень крепких горных породах (в лезниковском граните, лабрадорите, граносиените, габбро, граводиорите и т. п.).

Бурение и на стенде и в промышленных условиях производилось с промывкой водой, расход которой составлял 120 *л/мин*.

Исследования зависимости $v_{мех} = f(n)$ проводились в диапазоне скоростей вращения долот: на стенде 67—128—238—346 *об/мин*, в промышленных условиях 102—182—238—350 *об/мин*.

На рис. 63 представлены в общем виде графические зависимости $v_{мех} = f(n)$ для исследованных нами шарошечных долот.

Каждая кривая на рис. 63 соответствует постоянной величине осевой нагрузки на долото. Семейство кривых, приведенное на рис. 63, характеризует зависимость механической скорости бурения от скорости вращения долота в широком диапазоне изменения осевых нагрузок на долото.

Совместное рассмотрение и анализ представленных экспериментальных кривых $v_{мех} = f(n)$ показывает, что механическая скорость бурения шарошечными долотами типа ОК диаметром 76, 97 и 112 *мм* в крепких и особо крепких абразивных породах с ростом скорости вращения долота непрерывно возрастает, однако с увеличением скорости вращения долота темп роста механической скорости бурения снижается, т. е. последняя возрастает медленнее, чем увеличивается скорость вращения долота. Такой характер зависимости $v_{мех} = f(n)$ характерен для долот типа ОК всех конструкций диаметрами 76, 97 и 112 *мм* в диапазоне изменения параметров режима бурения и буримых породах и хорошо согласуется с результатами исследований других авторов.

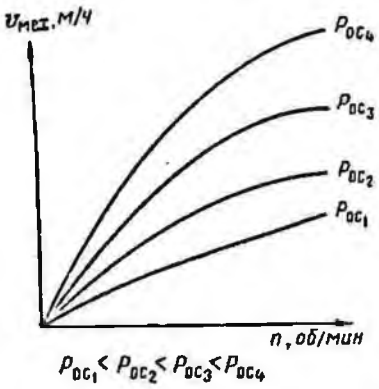


Рис. 63. Общий вид зависимости $v_{мех} = f(n)$ при бурении долотами 2Н-76-ОК, 4Н-76-ОК, 1Н-97-ОК (I и II варианты), 2Н-97-ОК и 3Н-112-ОК в лезниковском граните, лабрадорите, граносиените.

Зависимость $v_{мех} = f(n)$ для всех исследованных нами случаев может быть описана эмпирической формулой

$$v_{мех} = bn^x \ [м/ч], \qquad \text{(VIII.3)}$$

где b, x — безразмерные эмпирические величины.

Как видно из приведенных графиков, величина $x \leqslant 1$.

При бурении взрывных скважин шарошечными долотами всех размеров рекомендуется работать в диапазоне скоростей вращения долот от 120 до 250 *об/мин*.

Следует также заметить, что эти рекомендации нуждаются в дальнейшей экспериментальной проверке и уточнении для каждых конкретных горногеологических условий.

Эмпирические формулы зависимости механической скорости бурения шарошечными долотами от скорости вращения долота и осевой нагрузки на долото

В табл. 44 приведены в общем виде эмпирические зависимости $v_{мех} = f(P_{ос}, n)$, полученные различными исследователями при бурении шарошечными долотами различных типоразмеров и конструкций в различных горных породах.

Для шарошечных долот типа ОК диаметрами 76, 97 и 112 *мм* нами [4] получена эмпирическая формула, описывающая функцию $v_{мех} = f(P_{ос}, n)$ при достаточном для безусловной очистки забоя и ствола скважины расходе рабочего агента (технической воды или сжатого воздуха) для бурения в абразивных крепких и очень крепких горных породах.

Таблица 44

№ п/п	Автор	Эмпирическая зависимость механической скорости бурения от скорости вращения долота и осевой нагрузки на долото	Значения составляющих элементов эмпирических формул
1	2	3	4
1	В. С. Федоров [34] по данным Л. И. Штурмана	$v=an^xP_{oc}^y$	$a=0{,}0024$ для кашпрской свиты; $x=0{,}7$; $y=1{,}1$
2	В. С. Федоров [34] по данным Р. А. Бадалова	$v=an^xP_{oc}^y$	При $n \geqslant 840$ *об/мин* $x=0{,}45$ для района Баку
3	Ю. Ф. Потапов и В. В. Симонов [28]	$v=knP_{\lambda}^{1,4-0,0002n}$	Для известняка $k=0{,}059$; для мрамора $k=0{,}0083$; для гранита $k=0{,}0029$
4	В. К. Маурер [52]	$R=\frac{kNW^2}{D^2S}$	k — постоянная бурпмости пород; N — скорость вращения долота в *об/мин*; W — осевая нагрузка на долото; S — крепость породы; D — диаметр долота
5	Ван-Лингеп [47, 53]	$R=N^{0,8}W^{1,25}$	Обозначения те же, что и в п. 4
6	Вудс [56]	$R=aN\left(\frac{W}{D}\right)^b$	Обозначения те же, что и в п. 4; $b=1{,}0 \div 2{,}4$; a, b — эмпирические коэффициенты
7	Эккель, Кэннон Бипстейн	$R=aWN^{0,5}$	Обозначения те же, что и в пп. 4 и 6
8	Кэтлин	$R=a+bWN^c$	Обозначения те же, что и в пп. 4 и 6; $c<1$; c — эмпирический коэффициент
9	Вардруп, Кэннон [53]	$R=aWN^{0,4}$	Обозначения те же, что и в пп. 4 и 6
10	Мюррей [53]	$R=aWN$	Обозначения те же, что и в пп. 4 и 6
11	Каннингхем	$R=\frac{aWN^b}{D}$	Обозначения те же, что и в пп. 4 и 6; $s<1$
12	Ерэнтли [53]	$R=a+bNW$	Обозначения те же, что и в пп. 4 и 6
13	Я. А. Гельфгат и др. [15]	$v=kn^{\alpha}p^m$	$k=k_1b$; b — коэффициент, зависящий от типа долота, свойств пород, количества и свойств промывочного агента, характеристики промывочных устройств долота; k_1 — коэффициент пропорциональности; $k=5\cdot10^{-4}$ для сабунчинской и балаханской свит; m — показатель степени, зависящий от свойств пород; $m=0{,}6$ для очень мягких пород; $m=1$ для остальных категорий пород; α — показатель степени, зависящий от n; $a\approx1$

1	2	3	4
14	Р. А. Кашингхем	$v=AWN^a$	A, a — постоянные величины; W — нагрузка на дюйм диаметра долота; N — скорость вращения долота в *об/мин*
15	Д. С. Роулп, Р. Дж. Хоу, Ф. Х. Дили [58]	$R=kN^xW^y$ $R=a+bN+cN^2+dW+eW^2+fNW$	a, b, c, d, e, f — постоянные коэффициенты; значения N и W те же, что и в пп. 4, 6 и 8
16	В. Д. Буткин [10]	$v=\frac{v_м n}{n+n_0}$ $v=aP^m$	v — средняя механическая скорость бурения в *см/мин*; n — число оборотов долота в минуту; $v_м$ — предельная скорость проходки в заданных условиях бурения в *см/мин*; n_0 — число оборотов долота, при котором скорость бурения $v\approx 0.5v_м$; $0<m\leqslant 2$; $0<a\leqslant 6.3$
17	В. Д. Буткин [10]	$v=(k_1+k_2n)P$	Для некрепкого карбонатно-глинистого сланца $k_1=1{,}7$; $k_2=0.014$

Эта эмпирическая формула имеет следующий вид:

$$v_{мех}=kn^xP_{об}^y \qquad \text{(VIII.4)}$$

где $v_{мех}$ — средняя механическая скорость бурения в *м/ч*; n — скорость вращения долота в *об/мин*; $P_{об}$ — осевая нагрузка на долото в T; k, x, y — безразмерные эмпирические величины.

Условия проведенных нами исследований предусматривали совершенную очистку забоя и ствола скважины от выбуренной породы, т. е. экспериментальные исследования проводились при таком расходе рабочего агента, дальнейшее увеличение которого не приводило к росту механической скорости бурения.

В результате анализа формулы (VIII.4) и численных значений коэффициента k, показателей степеней x, y, полученных экспериментально, нами сделаны следующие выводы.

1. Значения коэффициента k в одних и тех же породах при применении одного и того же рабочего агента для очистки скважины постоянны для долот типа ОК диаметром 76, 97 и 112 *мм* всех испытанных конструкций. Коэффициент k зависит только от физико-механических свойств горных пород, от рода, количества и свойств рабочего агента для очистки забоя скважин от выбуренной породы.

В табл. 45 приведены полученные экспериментально значения коэффициента k при достаточном количестве рабочего агента для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы.

2. Значения показателя степени y при $P_{об}$ не зависят от осевой нагрузки на долото и скорости его вращения, рода и свойств рабочего агента для очистки скважины, а зависят от конструкции вооружения

Таблица 45

Бурение с промывкой водой			Бурение с продувкой воздухом	
граносиенит	лезниковский гранит	лабрадорит	граводиорит	габбро
0.00368	0.00300	0.00663	0.00862	0.00590

Таблица 46

Шифр долота					
2Н-76-ОК	4Н-76-ОК	1Н-97-ОК (I вариант)	1Н-97-ОК (II вариант)	2Н-97-ОК	3Н-112-ОК
1.700	1.857	1.570	1.648	1.557	1.407

шарошек долота и, возможно, от схемы и конструктивного решения промывочных (продувочных) устройств долота, а также от степени очистки призабойной зоны скважины.

В табл. 46 приведены значения y для долот всех изученных конструкций шарошечных долот типа ОК диаметрами 76, 97 и 112 *мм*.

Как видно из табл. 48, для шарошечных долот одного размера, выполненных на одних опорах шарошек: 2Н-76-ОК, 4Н-76-ОК, 1Н-97-ОК (I вариант), 1Н-97-ОК (II вариант) и 2Н-97-ОК, но имеющих различное по конструкции вооружение шарошек, показатели степени y при P_{oc} различны.

В связи с этим рассмотрим влияние конструкции вооружения шарошек на механическую скорость бурения долотами типа ОК малых размеров.

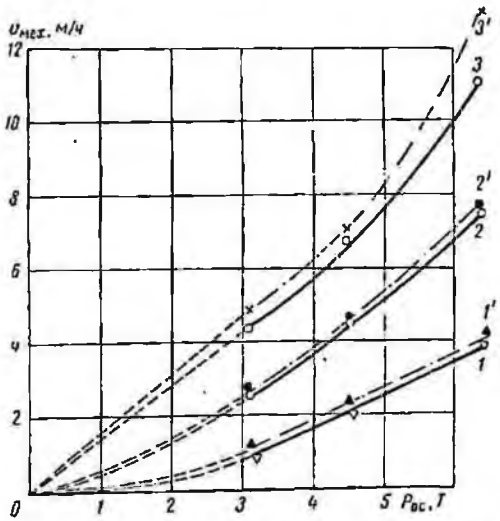


Рис. 64. Зависимость $v_{мех} = f(P_{oc})$ при бурении долотами 2Н-97-ОК и 1Н-97-ОК (I вариант) в лезниковском граните.
1, 2, 3 — долота 2Н-97-ОК; *1', 2', 3'* — долота 1Н-97-ОК (I вариант).
1, 1' — $n = 67$ *об/мин*; *2, 2'* — $n = 128$ *об/мин*; *3, 3'* — $n = 238$ *об/мин*.

Из графиков рис. 64 следует, что для долот 1Н-97-ОК (I вариант), разрушающих центральную зону забоя скважины вооружением вершин всех трех шарошек, характерен более интенсивный рост

механических скоростей бурения, чем для долот 2Н-97-ОК, поражающих центральную зону забоя скважины вооружением вершины только одной (первой) шарошки.

Из графиков рис. 65 видно, что темп роста $v_{мех}$ более интенсивен для долот с меньшими «воротниками» (у долот 2Н-76-ОК «воротники» равны 2,5—4,0 *мм*, у долот 4Н-76-ОК 1,2—1,5 *мм*), хотя у долот 4Н-76-ОК уменьшен вылет зубков на периферийных венцах шарошек до 2 *мм* против 3 *мм* у долот 2Н-76-ОК.

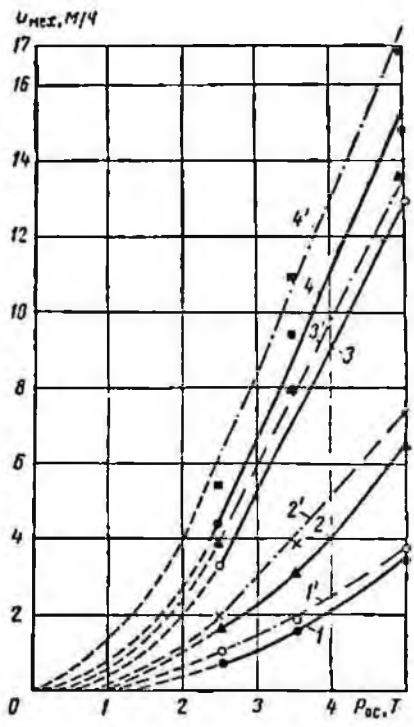


Рис. 65. Зависимость $v_{мех} = f(P_{ос})$ при бурении долотами 2Н-76-ОК и 4Н-76-ОК в лезниковском граните.

1, 2, 3, 4 — долота 2Н-76-ОК; *1', 2', 3', 4'* — долота 4Н-76-ОК. *1, 1'* — $n = 67$ *об/мин*; *2, 2'* — $n = 128$ *об/мин*; *3, 3'* — $n = 238$ *об/мин*; *4, 4'* — $n = 346$ *об/мин*.

Аналогичные выводы следуют из рис. 66 для долот 1Н-97-ОК (II вариант), имеющих «воротники», равные 0,4—1,5 *мм*, по сравнению с долотами 1Н-97-ОК (I вариант), у которых «воротники» составляют 1,4—2,3 *мм*.

Таким образом, при бурении долотами, разрушающими центральную зону забоя вооружением вершин всех трех шарошек, показатель степени y при $P_{ос}$, следовательно, и механическая скорость бурения несколько выше, чем для однотипных долот с серийной схемой вооружения, при которой центральная зона забоя разрушается зубками, которыми оснащена вершина только одной, первой шарошки (при серийной схеме вооружения вторая и третья шарошки имеют вид усеченных конусов и короче первой шарошки).

Для долот, разрушающих центральную зону забоя скважины вооружением вершин всех трех шарошек, показатель степени y при $P_{ос}$, а следовательно, и механическая скорость бурения выше для долот с меньшими «воротниками» (при бурении в хрупких и упруго-пластичных породах с коэффициентом пластичности, равным 1—2).

3. Значения показателя степени x изменяются от 0,8 до 1,0 с изменением скорости вращения долота, проходя в исследованном диапазоне скоростей вращения через явно выраженный максимум. В точке, соответствующей максимуму, $x = 1$.

Для долот 2Н-76-ОК и 4Н-76-ОК эта точка соответствует скорости вращения долота 238 *об/мин*. Для долот 1Н-97-ОК, 2Н-97-ОК и

ЗН-112-ОК этот максимум смещается в область меньших значений скорости вращения и соответствует скорости вращения долота 128 *об/мин*.

Результаты проведенных нами исследований [4], приведенных выше, достаточно хорошо согласуются с данными ряда отечественных и зарубежных исследователей.

Так, В. С. Федоров [34] указывал, что величина показателя степени y при $P_{об}$ для случая совершенной очистки при бурении в твердых и крепких породах составляет 1,25—2,0, а при бурении в глинистых породах величина y может достигать 3,0. Однако В. С. Федоров также говорит о том, что в зависимости от степени зашламления забоя величина y может снижаться до 1,0 и даже меньшей величины.

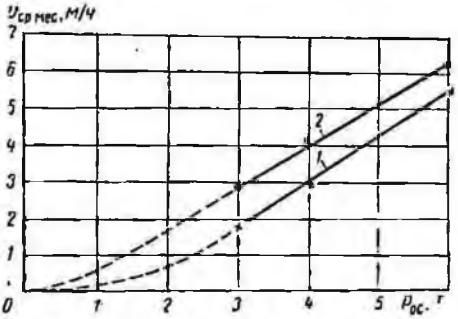


Рис. 66. Зависимость $v_{мех} = f(P_{ос})$ при бурении долотами 1Н-97-ОК (I вариант) (и 1Н-97-ОК) (II вариант) в граносиените, $Q = 120$ *л/мин*, $R = 182$ *об/мин*.

1 — долота 1Н-97-ОК (I вариант); *2* — долота 1Н-97-ОК (II вариант).

В. К. Маурер [52], основываясь на данных исследований, проведенных фирмой «Юз Тул Ко», а также материалах, полученных различными американскими исследователями [43, 44, 47, 48], утверждает, что для крепких пород при совершенной очистке забоя скважины величина показателя степени y составляет 1,7—2,3, а величина показателя степени x при $n \leqslant 300$ *об/мин* равна 1,0. Снижение величин x и y (пп. 5—12 табл. 44) В. К. Маурер объясняет ухудшением условий очистки забоя скважины, что явилось основной причиной снижения механической скорости бурения.

В табл. 47 приведены величины x и y по данным ряда американских исследователей.

Таблица 47

Автор	x	y
Ван-Лингем	0,8	1,25
Вудс	1,0	1,0—2,4
Эккель, Кэннон, Бинстейн	0,5	1,0
Кэтлин	$<1,0$	1,0
Вардруп, Кэннон	0,4	1,0
Мюррей	1,0	1,0
Каннингхем	$<1,0$	1,0
Р. Симон	—	1,0

Исследования [16, 17, 20] показывают, что при современном состоянии техники и технологии бурения взрывных скважин на отечественных карьерах величины показателей степени x и y весьма далеки от величин x и y, полученных В. С. Федоровым [34], В. К. Маурером [52], а также от наших данных [4].

В табл. 48 приводятся упомянутые материалы.

Таблица 48

Шифр долота	Наименование горной породы	Коэффициент крепости	Параметры режима бурения			x	y
			осевая нагрузка на долото, T	скорость вращения долота, об/мин	производительность компрессора, м³/мин		
8П-214-ОК	Доломиты	8—10	10—20	66—176	10	0.5—0.7	1.0—0.5
8П-214-ОК	Известняки	8—12	10—20	66—176	10	0.5—0.6	1.1—0.7
ОМ-575-8Т	Перидотиты	11—14	8—15.3	50—206	10	0.7—0.8	1.0—0.07
8В-190К	Диориты	14	15	60—250	10	0.6	—
8В-190К	»	14	15	60—250	10	0.7	—
8В-190К	»	10—12	10.8—16	100—250	10	0.4—0.7	0.3—0.8
8Н-214-ОК	Известняки	10—13	20	88—176	13—31	0.6	—
8Н-214-ОК	Вторичные кварциты	12—14	До 12	250—600	9	0.3	0.3

Рассматривая состояние и характер износа отработанных долот, можно отметить, что основными причинами выхода из строя долот в условиях, характеризующихся данными, приведенными в табл. 9, являются:

— зашламление опор шарошек вследствие попадания в их полость частиц выбуренной породы, что приводит к интенсивному износу и последующему заклиниванию опорных подшипников;

— интенсивный износ козырьков и спинок лап, а также обратных конусов шарошек, что является причиной обнажения и выпадения тел качения периферийных подшипников опор шарошек, а также зашламления опор.

Такой характер износа отработанных долот свидетельствует о крайне неудовлетворительной очистке призабойной зоны скважины от выбуренной породы.

На основании этих материалов Ю. С. Лопатин приходит к справедливому выводу о том, что низкие величины x и y, приведенные в табл. 50 (также см. табл. 44), объясняются крайне неудовлетворительной очисткой призабойной зоны скважины.

Такой вывод весьма убедительно подтверждается следующим экспериментом.

Работая на обращенном забое, т. е. когда образец разбуриваемой породы установлен в вертикальном положении над долотом и когда безусловно обеспечивается совершенная очистка забоя за счет удаления частиц породы под действием гравитационных сил, при $n < 40$ *об/мин* Ю. С. Лопатин получил величины y, равные или превышающие 2,0.

В табл. 49 приведены величины y, полученные при разбуривании блоков породы шарошечными долотами диаметром 76 *мм* различных типов методом обращенного забоя.

Таблица 49

Шифр долота	Наименование горной породы	Диапазон изменения осевых нагрузок на долото, *Т*	y
4Д-76К	Темносерый гранит	0,5—3,5	2,1
2Н-76-ОК	То же	0,5—3,5	2,1
4Н-76-ОК	»	0,5—3,5	2,0
4Н-76-ОК	Лабродорит	0,5—3,5	2,4
2Н-76-СТ	Известняк I	0,15—1,5	2,2
1Н-76-СТ	Известняк II	0,25—1,0	2,3

Таким образом, в результате проведенных нами исследований и сопоставительного анализа материалов исследований отечественных и зарубежных авторов в самых разнообразных условиях при бурении шарошечными долотами различных конструкций, типов и размеров в различных по физико-механическим свойствам горных породах можно полагать, что для всех шарошечных долот независимо от их конструктивных особенностей, типов и размеров, а также свойств горных пород, при бурении в которых проводились исследования, существует общий закон, учитывающий одновременное влияние скорости вращения и осевой нагрузки на долото и на механическую скорость бурения. Подавляющее большинство эмпирических формул, описывающих зависимость $v = f(n, P_{oc})$, имеет одинаковый вид (см. табл. 44).

При этом эмпирические коэффициенты и показатели степени при n и P_{oc} определяются конструктивными особенностями, типом и размером шарошечных долот, условиями бурения, физико-механическими свойствами буримых горных пород, а также степенью очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы.

Анализируя формулу $v_{мех} = f(n, P_{oc})$, можно также сделать заключение о целесообразности увеличения механической скорости бурения при условии совершенной очистки забоя скважины от выбуренной породы не за счет значительного увеличения скорости вращения долота, так как $x = 0,8 \div 1,0$, а за счет роста осевых нагрузок на долото, ибо $y = 1,4 \div 2,40$ в зависимости от размера и конструкции долота. Однако последнее в ряде случаев лимитируется прочностью элементов конструкции шарошечных долот.

§ 4. Зависимость проходки на долото и стойкости долот от параметров режима бурения

Анализ отработки шарошечных долот в промышленных условиях показывает, что до 80% от общего количества изготовляемых отечественными заводами шарошечных долот [34] выходят из строя в результате износа элементов их опор, т. е. стойкость шарошечных долот в настоящее время определяется главным образом стойкостью их опор.

Несмотря на это, в настоящее время явно недостаточно исследовано влияние свойств буримых пород и параметров режима бурения на стойкость шарошечных долот, обусловливаемую стойкостью их опор [1], что объясняется сложностью проведения экспериментальных исследований в промышленных условиях. Эти исследования носят весьма разнообразный характер; более того, как справедливо отмечает В. С. Федоров, до настоящего времени никто ими систематически и не занимается. В связи с этим нами будут отмечены только общие тенденции и дан примерный качественный анализ зависимости стойкости шарошечных долот от физико-механических свойств буримых пород и параметров режима бурения.

Средняя механическая скорость бурения, проходка на долото (пробуренный им до выхода из строя метраж) и стойкость долота во времени связаны уравнением

$$v_{мех} = \frac{H}{T} \ [м/ч], \qquad \text{(VIII.5)}$$

или

$$T = \frac{H}{v_{мех}} \ [ч], \qquad \text{(VIII.5')}$$

$v_{мех} = f(n)$ и $v_{мех} = f(P_{oc})$ в исследованном диапазоне изменения n и P_{oc} являются возрастающими функциями.

По данным ряда исследователей [9, 22, 28, 52] с увеличением скорости вращения долота проходка на долото (в метрах) возрастает до определенного предела, а затем начинает убывать, т. е. функция $H = f(n)$ имеет четко выраженный максимум.

Аналогичные результаты также получены нами при исследовании работы долот типа ОК диаметром 76, 97 и 112 *мм*.

Из графиков рис. 67 видно, что с увеличением скорости вращения долота проходка на долото вначале возрастает до некоторого максимального значения, причем темп роста проходки на долото отстает от темпа увеличения скорости вращения долота. Дальнейшее увеличение скорости вращения долота приводит к снижению проходки на долото [4].

Зависимость проходки на долото от осевой нагрузки на долото по данным различных авторов в некоторых случаях имеет явно

[1] Далее под стойкостью шарошечных долот, обусловливаемой стойкостью их опор, нами будет пониматься продолжительность работы шарошечных долот во времени до выхода их из строя из-за износа элементов опор шарошек.

выраженный максимум, в некоторых — это убывающая функция, а в ряде случаев — возрастающая функция.

Отсутствие явно выраженной закономерности $H = f(P_{oc})$, по-видимому, объясняется различным проявлением взаимного влияния на H сочетаний скоростей вращения и осевых нагрузок на долото.

М. И. Кулачок [16] указывает на непрерывное увеличение проходки на долото 8В-190К в диапазоне изменения осевых нагрузок на долото от 10 до 17 T при бурении взрывных скважин в монолитных (с $f = 12 \div 14$) и трещиноватых (с $f = 10 \div 12$) диоритах, при котором темп роста проходки опережает темп увеличения осевой нагрузки на долото.

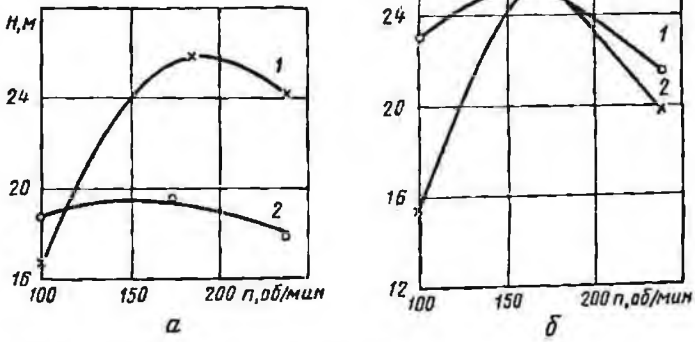


Рис. 67. Зависимость проходки на долото от скорости вращения долота.

а — долота 4Н-76-ОК, граносиенит, $Q = 120$ л/мин; 1 — $P_{oc} = 3$ T; 2 — $P_{oc} = 5$ T; б — долота 1Н-97-ОК (I вариант), граносиенит, $Q = 120$ л/мин; 1 — $P_{oc} = 4$ T; 2 — $P_{oc} = 6$ T.

При бурении взрывных скважин в магнетитовых рудах (с $f = 8 \div 10$) долотами 1В-190Т в диапазоне изменения скоростей вращения долот от 110 до 200 *об/мин* при $P_{oc} = 13$ T проходка на долото непрерывно уменьшается обратно пропорционально увеличению скорости вращения долот. Аналогичные результаты по влиянию скорости вращения долот на проходку на долота 2В-8ТК при бурении взрывных скважин в шершневских гранитах с $f = 12 \div 14$ ($P_{oc} = 10$—20 T, $n = 30$—160 *об/мин*) получены В. Д. Буткиным [10, 11]. А. Ф. Суханов [30], исследуя работу долот ОМ-575-8Т при бурении взрывных скважин в перидотитах с $f = 8 \div 14$ в диапазоне изменения осевых нагрузок на долото от 8 до 14 T и скорости вращения долота от 85 до 206 *об/мин*, приходит к выводу о некотором снижении проходки на долото в зависимости как от увеличения P_{oc}, так и от увеличения n (в исследованном диапазоне их изменения).

В то же время Г. С. Филиппов и А. Н. Лукьянов [33] показывают, что при бурении в кварцитах с $f = 14 \div 16$ и $f = 16 \div 18$ долотами ОМ-29-11ОК (при $n = 100$ *об/мин* и $P_{oc} = 20$—40 T) зависимость проходки на долото с увеличением осевой нагрузки имеет

явно выраженный максимум в области осевых нагрузок на долото, равных 32—34 T.

При исследовании долот типа ОК диаметром 76, 97 и 112 *мм* нами, однако, не получена четкая зависимость $H = f(P_{oc})$ [4].

Решение этого вопроса может быть произведено постановкой специальных исследований по изучению механики шарошечных долот с различными конструктивными элементами вооружения шарошек и опор долот при различных сочетаниях параметров режима бурения.

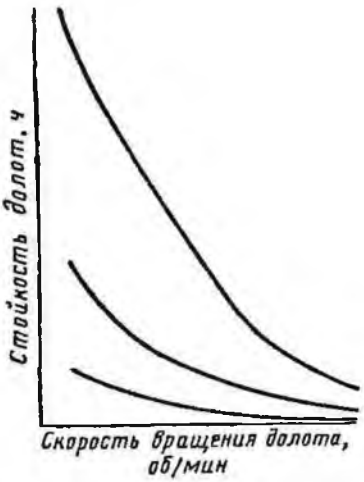


Рис. 68. Общий вид зависимости $T = f(n)$ для долот диаметром 76, 97 и 112 *мм* типа ОК при бурении в абразивных крепких и очень крепких породах.

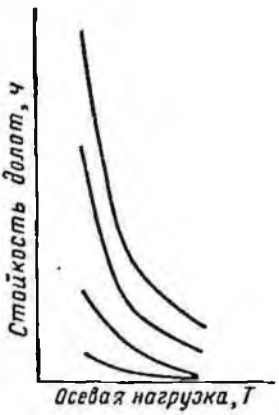


Рис. 69. Общий вид зависимости $T = f(P_{oc})$ для долот диаметром 76, 97 и 112 *мм* типа ОК при бурении в абразивных крепких и очень крепких породах.

В отношении характера зависимостей $T = f(n)$ и $T = f(P_{oc})$ у ряда исследователей нет единого мнения.

Так, если некоторые исследователи отмечают, что с увеличением скорости вращения долот их стойкость снижается быстрее роста n, т. е. функция $T = f(n)$ имеет вид гиперболы, то с увеличением осевой нагрузки на долото одни исследователи [15] указывают на линейное уменьшение стойкости долота, а другие [34] — на более резкое снижение стойкости долота, при котором $T = f(P_{oc})$ так же, как и $T = f(n)$, имеет вид гиперболы.

Однако и те и другие исследователи говорят лишь о приближенной связи между параметрами режима бурения и стойкостью долота в связи с недостаточностью располагаемых ими данных.

Анализ графиков рис. 68 и 69 показывает, что в исследованных нами диапазонах изменения параметров режима бурения и буримых породах для шарошечных долот типа ОК новых малых размеров

(диаметров 76, 97 и 112 *мм*) изученных конструкций увеличение скорости вращения долота и осевой нагрузки на долото приводит к снижению стойкости долота. При этом снижение стойкости долота происходит интенсивнее увеличения как скорости вращения долота, так и осевой нагрузки на долото, т. е. и $T = f(n)$ и $T = f(P_{oc})$ имеют вид неравнобочных гипербол [4].

По виду кривых $T = f(n)$ и $T = f(P_{oc})$ в соответствии с правилами математической статистики, методами обработки экспериментальных данных и построения эмпирических формул для $T = f(n, P_{oc})$ при совершенной очистке забоя скважины нами подобрана следующая эмпирическая формула, описывающая зависимость стойкости долота от параметров режима бурения:

$$T = e^{-cn} n^{m - rP_{oc}} \qquad \text{(VIII.6)}$$

или

$$\lg T = -cn + (m - rP_{oc}) \lg n, \qquad \text{(VIII.6')}$$

где T — стойкость шарошечного долота в *ч*; P_{oc} — осевая нагрузка на долото в T; n — скорость вращения долота в *об/мин*; c, m, r — безразмерные эмпирические величины; e — основание натуральных логарифмов.

В табл. 50 приведены полученные экспериментально значения этих эмпирических величин.

Таблица 50

Род рабочего агента		Шифр долота				
		2Н-76-ОК	4Н-76-ОК	1Н-97-ОК		3Н-112-ОК
				I вариант	II вариант	
c	Вода	0,01420	0,01420	0,00823	0,00823	0,00738
	Воздух	0,02335	0,02335	—	—	0,05560
m	Вода	1,38	1,6127	1,000	1,020	0,848
	Воздух	1,38	1,6127	—	—	0,848
r	Вода	0,188	0,188	0,0685	0,0685	0,0529
	Воздух	0,188	0,188	—	—	0,0529

Анализ результатов исследований и числовых значений величин c, m и r показал.

1. Значения c зависят от рода, количества и свойств рабочего агента для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы, а также, по-видимому, от конструкции, размеров и расположения относительно забоя скважины каналов, по которым через долото подводится к забою скважины рабочий агент.

2. Значения m зависят только от конструкции вооружения шарошек и не зависят от конструкции опор шарошек, размеров, конструкции и расположения относительно шарошек и забоя скважины

промывочных устройств, рода, количества и свойств рабочего агента для очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы.

3. Для долот типа ОК одного размера, выполненных с одними опорами, но различным вооружением шарошек, значения r одинаковы независимо от конструкции, размеров и относительного расположения промывочных устройств, рода рабочего агента для очистки забоя скважины от выбуренной породы, например, для долот 2Н-76-ОК, 4Н-76-ОК; 1Н-97-ОК (I вариант) и 1Н-97-ОК (II вариант).

С увеличением диаметра долота от 76 до 112 *мм* значение r уменьшается. Это объясняется увеличением стойкости опор с увеличением диаметра долота за счет выполнения долота на более мощных опорах.

§ 5. К вопросу о распределении подводимого к долоту сжатого воздуха в продувочных устройствах долота

Качество удаления из призабойной зоны скважины бурового шлама непосредственным образом влияет на механическую скорость бурения и стойкость долота во времени.

Поэтому в процессе бурения чрезвычайно важно знать фактический расход воздуха, подводимый к долоту и поступающий на забой скважины для его очистки, а также поступающее в полость опор шарошек количество сжатого воздуха для их охлаждения в процессе бурения и предотвращения попадания в них бурового шлама.

Производить необходимые замеры в производственных условиях в настоящее время не представляется возможным из-за отсутствия специальных приборов. Но даже при наличии таких приборов использование их на буровых станках вряд ли целесообразно из-за высокого уровня вибраций, что будет приводить к выходу чувствительных приборов из строя.

В связи с этим с целью создания экспресс-метода для определения фактического расхода сжатого воздуха через долото и распределения его в продувочных устройствах долота группой сотрудников ВНИИБТ проведены специальные исследования [23, 24].

Методической основой этих исследований была зависимость давления внутри буровых штанг (колонны бурильных труб) P_1 от расхода воздуха Q.

Исследования проводились на специальном лабораторном стенде, оснащенном современными показывающими и регистрирующими приборами, на реальных долотах различных типов и конструкций диаметром 190 *мм* и на разборной плексиглассовой модели долота натуральной величины диаметром 190 *мм*, позволяющей имитировать различные схемы продувочных устройств с применением сменных сопел (насадок) различных размеров и форм.

На основании теоретических построений, базирующихся на уравнении Сен-Венана — Венцеля, уравнении состояния, уравнении адиабатического процесса, авторами [23, 24] предложены формулы

для расчета расхода воздуха, выраженного через величины давления и температуры воздуха внутри колонны бурильных труб и давления воздуха в затрубном пространстве:

для $\frac{p_1}{p_0} \geqslant 0{,}53$ (дозвуковые скорости истечения воздуха из сопла)

$$Q_m = 75{,}7F_0 \frac{p_0}{\sqrt{T_1}\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{0{,}29}} \sqrt{1-\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{0{,}29}} \; [м^3/мин]; \quad \text{(VIII.7)}$$

для $\frac{p_1}{p_0} \leqslant 0{,}53$ (сверхзвуковые скорости истечения)

$$Q_m = 20 \frac{F_0 p_1}{\sqrt{T_1}} \; [м^3/мин], \quad \text{(VIII.8)}$$

где p_0 — давление в затрубном пространстве скважины (если пренебречь потерями давления — сопротивления в затрубном пространстве, $p_0 = 1$ *кГ/см*^{2}); p_1 — давление сжатого воздуха внутри буровых штанг (для воздуха звуковая скорость истечения достигается при p_0: $p_1 = 0{,}53$, т. е. при $p_0 = 1$ *кГ/см*^{2} звуковые скорости истечения достигаются при $p_1 = 1{,}9$ *кГ/см*^{2}); T_1 — абсолютная температура воздуха до истечения в °К; F_0 — минимальная площадь сечения сопла в *м*^{2}.

С учетом несовпадения площади сечения сопла с площадью сечения струи фактический расход воздуха составит

$$Q = \varphi Q_m \; [м^3/мин], \quad \text{(VIII.9)}$$

где φ — коэффициент истечения (для хорошо обработанных сопел, имеющих круглое сечение, $\varphi = 0{,}96 \div 0{,}98$).

Теоретические кривые, построенные по формулам (VIII.7) и (VIII.8), дают хорошее совпадение с экспериментальными кривыми.

Формулу (VIII.9) можно представить в общем виде через удельный расход

$$Q = \varphi F_0 q \; [м^3/мин]. \quad \text{(VIII.10)}$$

На рис. 70 показана зависимость q от p_1 для сопел с $\varphi = 1$ для $T_1 = 293°$ К; при T_1, отличающемся от 293° К, следует пользоваться формулой

$$Q = 17{,}1 \varphi F_0 \frac{q}{\sqrt{T_1}} [м^3/мин], \quad \text{(VIII.11)}$$

где F_0 в *см*^{2}.

Пример пользования формулой (VIII.11) и графиком рис. 70

При работе одного компрессора (из двух установленных) давление в нагнетательной линии станка БСВ-2Е на Докучаевском флюсодоломитном комбинате составляло: при одной штанге $p_1 = 2{,}2$ *кГ/см*^{2}; при двух штангах $p_1 = 2{,}0$ *кГ/см*^{2}; при трех штангах $p_1 =$

$= 1{,}7$ *кГ/см²* (падение давления связано с применением безрезьбовых соединений штанг, через которые имеется утечка части воздуха). Центральное сопло диаметром 20 *мм* со скругленным входом, т. е. $\varphi = 1$, $T_1 = 333°$ К. Потерями в нагнетательной 3—$3^1/_2$" линии длиной 18—20 *м* можно пренебречь. Долото 8Н-214-ОК. Решение выполним в виде табл. 51.

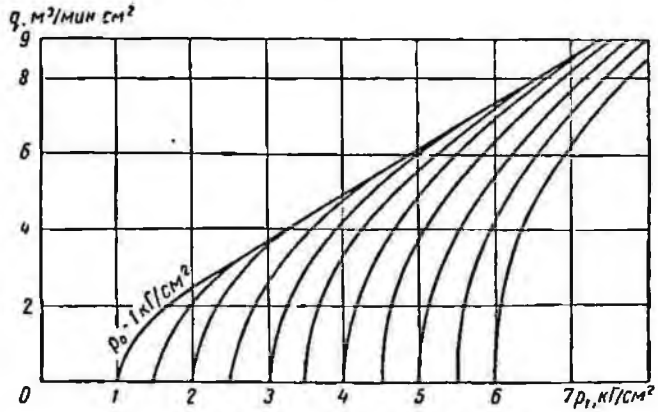


Рис. 70. Зависимость q от p_1 при различных значениях p_0 при $\varphi = 1$.

Полученные в табл. 51 расходы воздуха, естественно, не характеризуют производительность компрессоров, так как имели место утечки в резьбовых соединениях штанг и часть поступающего в долото воздуха шла на продувку опор шарошек.

Таблица 51

p_1, кГ/см²	Значения из номограммы рис. 70	Температурная поправка по формуле (VIII. 11)	Площадь сечения сопла, см²	Расход воздуха на очистку забоя, м³/мин
2.2	2.65	0.94	3.14	7.8
2.0	2.40	0.94	3.14	7.1
1.7	2.0	0.94	3.14	5.9

Учитывая, что утечки воздуха в штанговых соединениях ненормальное явление, производительность компрессоров должна определяться суммарной потребностью в расходе воздуха для эффективной очистки скважины от шлама и для продувки опор шарошек.

В качестве примера представлены результаты экспериментальных исследований, позволивших определить суммарный расход воздуха через долото и распределение его в продувочных устройствах долота (рис. 71).

Как показал анализ, ординаты точек кривой *3*, характеризующей расход воздуха через долото, являются суммой ординат точек

кривых *1* и *2*, которые характеризуют расход воздуха соответственно через каналы в лапах и цапфах лап и через центральное сопло. Аналогичные зависимости получены и для других долот.

Как показали эксперименты, в опоры долота поступает от 5% (долото 1В-190Т) до 25—30% (долота 7Н-190ОКП и др.) от общего расхода воздуха, подводимого к долоту, что определяется соотношением площадей сечений и конструктивным решением элементов продувочных устройств.

Минимальное сечение продувочных каналов для подвода воздуха в полость опор шарошек соответствует сечению продувочного канала в цапфе лапы, для которого $\varphi = 0{,}62$. Тогда по номограмме либо по формулам (VIII.7) или (VIII.8) определяется та часть подводимого к долоту воздуха, которая поступает в полость опор шарошек (в случае очень густой смазки или зашламления опор шарошек или продувочных каналов этот расход может снизиться до нуля).

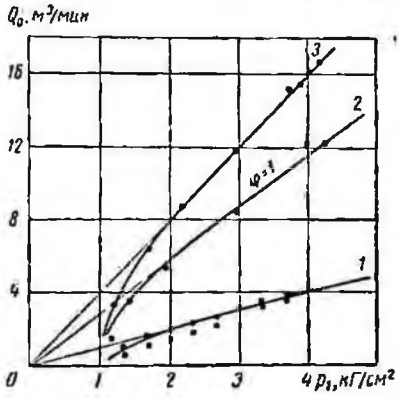


Рис. 71. Зависимость p_1 от Q_0 для долота 7Н-190ОКП.

1 — расход воздуха через продувочные каналы в лапах и цапфах лап (для продувки опор); *2* — расход воздуха через центральное сопло; *3* — суммарный расход воздуха, подводимого к долоту.

Для приведенного выше примера расход воздуха через опоры составил при одной штанге 2,2 *м³/мин*, при двух штангах 2,11 *м³/мин*, при трех штангах 1,74 *м³/мин*.

Сравнение полученных данных позволяет судить о величине утечек в штанговых соединениях станка БСВ-2Е: при первом наращивании потери возросли на 0,8 *м³/мин*, при втором на 2,49 *м³/мин*.

§ 6. Основные правила технической эксплуатации шарошечных долот при бурении взрывных скважин

Тип и размер шарошечного долота следует выбирать, исходя из физико-механических свойств буримых пород, требований буровзрывных работ, необходимого качества дробления горных пород и полезных ископаемых, а также с учетом сейсмического действия взрывных зарядов различных диаметров на близлежащие объекты, предохранительные и прочие целики.

От правильного выбора типа долота и технологии бурения в основном зависят показатели бурения шарошечными долотами.

Тип долота (вооружения его шарошек) должен соответствовать свойствам буримых пород.

В настоящее время имеется много типов шарошечных долот для бурения взрывных скважин. Это необходимо правильно

использовать, так как правильный подбор типов шарошечных долот в соответствии со свойствами буримых пород в значительной мере определяет эффективность применения и показатели их работы.

В табл. 52 приведены рекомендации по правильному подбору типов шарошечных долот, основанные на многолетних исследованиях, проведенных ВНИИБТ, и анализе результатов отработки долот на большом числе горных предприятий страны.

Таблица 52

Тип шарошечного долота	Область эффективного применения	Буримые породы	
		наименование	ориентировочный коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова
С и СТ	Неабразивные породы ниже средней и средней твердости	Плотные глины, гипс, соли, мергели, песчанистые сланцы, неплотные известняки средней твердости, глинизированные песчаники, огипсованные известняки и т. п.	$\leqslant 6$
Т	Неабразивные и малоабразивные твердые породы	Твердые сланцы, известняки и т. п.	6—8
ТЗ	Вязкие абразивные твердые породы	Апатито-нефелиновые руды, перидотиты, доломитизированные окварцованные известняки и доломиты, габбро и т. п.	8—12
ТК	Малоабразивные твердые породы с пропластками крепких пород средней абразивности	Мелкокристаллические известняки с пропластками доломитов, слабо доломитизированные известняки и т. п.	8—10
ТКЗ	Перемежающиеся абразивные твердые вязкие и крепкие хрупкие породы	Окварцованные известняки с прослоями доломитов, серицито-хлоритокварцевые сланцы и т. п.	8—12
К	Хрупкие абразивные крепкие породы	Окремнелые известняки, доломиты, средне- и мелкозернистые плотные песчаники и т. п.	10—12
ОК	Очень крепкие хрупкие абразивные породы	Граниты, гнейсы, роговики, скарны, кварциты, диориты, джеспилиты и т. п.	$\geqslant 12$—18

Правильное применение шарошечных долот является необходимым, но еще недостаточным условием для повышения показателей работы шарошечных долот.

Значительным резервом для повышения показателей работы правильно подобранных типов шарошечных долот является разработка рациональной технологии бурения, т. е. установление таких сочетаний параметров режима бурения (скорости вращения долота, осевых нагрузок на долото и расхода сжатого воздуха для очистки забоя и ствола скважины от бурового шлама, охлаждения и продувки опор шарошек долот), при которых достигается максимальный экономический эффект.

В первую очередь это относится к режиму очистки забоя и ствола скважины от бурового шлама, охлаждения и смазки элементов опор шарошек долот в процессе бурения. Практически у большинства отработанных серийно изготовляемых долот (около 60%) спинки и козырьки лап изношены до обнажения тел качения периферийных подшипников. В результате происходит заклинивание опор одной или всех шарошек и долота преждевременно выходят из строя.

Одной из основных причин такого положения является крайне недостаточная производительность компрессоров, смонтированных на шасси буровых станков типа БСШ (8 *м*³/*мин*) и типа БСВ (10 *м*³/*мин*).

Из этого количества воздуха примерно 25% поступает в полость опор шарошек и 75% на забой для его очистки. Однако расход воздуха 2—2,5 *м*³/*мин* недостаточен для охлаждения элементов опор и предотвращения попадания шлама в полость опор шарошек, в результате чего опоры одной или всех шарошек перегреваются, забиваются шламом и заклиниваются, а 6—7,5 *м*³/*мин* также недостаточно для эффективной очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы, в результате чего шлам многократно на забое переламывается и подвергает интенсивному абразивному износу спинки и козырьки лап.

Эксперименты, проведенные авторами, показывают, что для долот диаметром 190 *мм* увеличение фактического расхода воздуха до 13—15 *м*³/*мин* приводит к росту проходки на долото на 41—55% и механической скорости бурения на 25—36%, однако полностью не устраняет износа козырьков и спинок лап и заклинивания шарошек. Следует отметить, что темп роста проходки на долото и механической скорости бурения при этом не снижается, что свидетельствует о возможности дальнейшего улучшения показателей работы шарошечных долот за счет дальнейшего увеличения расхода подводимого к долоту сжатого воздуха.

Показатели бурения шарошечными долотами в значительной мере зависят также и от сочетания параметров режима бурения.

Для наиболее эффективного использования шарошечных долот типов ОК и ТЗ следует руководствоваться рекомендациями, приведенными в табл. 53.

В крепчайших абразивных породах целесообразно снижать скорость вращения долот до 80 *об/мин* с одновременным некоторым увеличением осевой нагрузки на долото.

Таблица 53

Диаметр долота, мм	Диаметр бурильных труб (штанг), мм	Осевая нагрузка на долото, Т	Скорость вращения долота, об/мин	Расход рабочего агента при бурении	
				с продувкой воздухом, м³/мин	с промывкой водой, л/мин
76	63.5	4	120—200	4—5	60
97	73	6	120—200	5	80
112	89	9	120—200	5	120
145	89—144	12	120—250	10	200
190	150	18	120—250	15	—
214	1 0	22	120—250	18	—
243	194	28	120—250	27	—
269	219	32	120—250	40	—
295	245	40	120—250	50	—

Рекомендуемые в табл. 53 сочетания параметров режимов бурения обеспечивают минимальные затраты на бурение шарошечными долотами при максимальных или близких к ним производительностях бурения за станко-смену.

Шарошечные долота должны храниться на складе под навесом. Хранение долот на открытых площадках во избежание коррозии их деталей и узлов не должно допускаться. При бестарном хранении долот их присоединительная резьба должна быть предохранена от механических повреждений специальными колпачками или другими средствами.

Во избежание поломок деталей долот, появления в них дефектов, их засорения и загрязнения запрещается сбрасывать долота на металлические или твердые предметы и транспортировать их к буровому станку волоком.

Перед началом бурения машинист бурового станка обязан убедиться в отсутствии внешних пороков (трещин и изломов в деталях долота, трещин в сварных швах, смятия резьб), проверить, не забиты ли грязью или посторонними предметами промывочные (продувочные) каналы в корпусе и лапах долот, свободно и плавно ли вращаются на своих опорах шарошки, не зацепляются ли друг за друга зубки шарошек.

В случае заедания шарошек их опоры должны быть промыты керосином или дизельным топливом. Шарошки на своих опорах должны свободно и плавно вращаться от руки. При обнаружении в долоте пороков, ликвидировать которые машинист бурового станка не в состоянии, долото следует отправить в механическую мастерскую для их устранения (исправления резьбы, расхаживания шарошек вращением) или на склад для предъявления претензий заводу-изготовителю.

Перед навинчиванием долота необходимо тщательно очистить и смазать резьбу. Навинчивание долота должно производиться при

помощи специального ключа бурового станка до полного закрепления резьбового соединения.

При навинчивании и спуске долота в скважину следует избегать ударов, которые могут привести к образованию в процессе бурения трещин и поломок долота и его деталей.

Каждое новое долото перед началом бурения должно быть приработано в течение 10—15 *мин* при уменьшенных до 10—15% от рекомендуемых в табл. 53 осевых нагрузках.

Бурение следует начинать при вращении долота с плавного увеличения осевой нагрузки и последующим увеличением ее до оптимальной величины для конкретных групп горных пород и типоразмеров шарошечных долот. В процессе бурения подача долота на забой должна быть равномерной, без скачков и перегрузок, так как последние могут привести к поломкам деталей и долота в целом и к преждевременному выходу долота из строя.

Забуривание скважины без подачи промывочного (продувочного) агента категорически запрещается.

Имеющиеся на предприятиях буровые станки БСШ-1М, БСШ-2М, БСВ и другие комплектуются компрессорами, суммарная производительность которых (номинальная) составляет 9—10 $м^3/мин$. Такой расход воздуха не обеспечивает эффективной очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы в процессе бурения, что приводит к многократному переизмельчению породы, неудовлетворительному охлаждению долота и его элементов, зашламлению опор шарошек, их заклиниванию, прогрессивному износу козырьков и спинок лап до обнажения и выпадения тел качения, т. е. к преждевременному выходу из строя долота и снижению скорости бурения.

На карьерах Докучаевского флюсодоломитного комбината и комбината Ураласбест для увеличения расхода подаваемого в скважину воздуха компрессоры буровых станков переоборудованы и работают в одноступенчатом режиме, т. е. цилиндры обеих ступеней сжатия работают параллельно, что позволяет увеличить расход воздуха на 30%.

На ряде предприятий (Алтын-Топканский комбинат, Оленегорский ГОК, комбинат «Кара-Тау» и др.) к воздушной магистрали части буровых станков подсоединяют дополнительные прицепные компрессоры.

Эти мероприятия позволяют увеличить как проходку на долото, так и механическую скорость бурения.

При бурении одним долотом нескольких скважин после окончания каждой из них следует тщательно осмотреть долото.

Следует при этом учесть, что часто у поднятого из скважины долота шарошки не вращаются вследствие попадания в полости их опор шлама. В этом случае шарошки следует промыть и раскрутить.

После бурения каждой скважины опоры шарошек рекомендуется промыть дизельным топливом и смазать жидким смазочным материалом.

При бурении скважин в породах с незначительным водопритоком следует увеличить расход и давление сжатого воздуха. Часто в таких породах в скважинах образуются сальники.

Для их ликвидации в поток подаваемого в скважину воздуха следует добавлять некоторое количество воды (например, при бурении долотами диаметром 190 и 214 *мм* — до 25—30 *л/мин*).

При бурении в породах со значительными водопритоками, а также в случаях бурения с воздушноводяной смесью во избежание попадания шлама в опоры через продувочные каналы в лапах и предупреждения вследствие этого преждевременного выхода долота из строя в центральном канале долота следует устанавливать обратный клапан. Конструкции обратных предохранительных клапанов разработаны кандидатом технических наук Г. С. Филипповым (институт Гипроникель) и механиком Запорожского участка Харьковского управления Взрывпром Н. М. Побейвовк и широко применяются на карьерах Ждановского ГОК, Запорожского карьероуправления и др. Эти клапаны просты по устройству, могут быть изготовлены в условиях рудничных мастерских и используются многократно. Применение обратных клапанов в долотах позволяет увеличить проходку на долото от 30—50% до 2—2,5 раза.

Наблюдения за отработкой шарошечных долот на значительном числе горных предприятий показало, что до 30—40% штыревых долот недорабатывается.

Следует учесть, что скол и выпадение части твердосплавных зубков шарошек в количестве до 20% не может явиться причиной прекращения использования долота, так как при работоспособных опорах шарошек механическая скорость бурения штыревыми долотами снижается незначительно.

Признаками полного износа штыревого долота при его наружном осмотре являются:

— полный износ вооружения шарошек, выпадение зубков до 40%, скол зубков до 70—100%;

— износ вершин шарошек, спинок и козырьков лап долот до обнажения тел качения;

— значительные люфты в опорах шарошек (до 3—6 *мм* в зависимости от размера долота и конструкции опор шарошек);

— характерные плоские площадки (лыски) на шарошках вследствие заклинивания их опор.

В процессе бурения признаками заклинивания опор шарошек или полного износа долота являются резкое снижение механической скорости бурения или полное прекращение углубления, сопровождающееся неравномерным вращением инструмента с сильными рывками и сильной вибрацией буровых штанг и станка.

Если при бурении в крепких абразивных породах после очередной скважины вооружение долота значительно изношено, но еще работоспособно или долото имеет значительный износ по диаметру, такое долото следует использовать только для добурпвания до проектной глубины последующих скважин.

Соблюдение правил эксплуатации долот всеми машинистами буровых станков, несомненно, приведет к значительному повышению производительности и снижению стоимости буровых работ.

На каждом предприятии необходимо также наладить действенный учет и анализ результатов отработки шарошечных долот. Это позволит не только подобрать для каждого предприятия и отдельных участков месторождения полезных ископаемых, разрабатываемого данным предприятием, наиболее эффективные типы и конструкции шарошечных долот, но и вскрыть дополнительные резервы повышения производительности и экономичности буровых работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамсон М. Г. Бурение взрывных скважин шарошечными долотами при подземной добыче руд и основные направления их совершенствования. Сб. «Совершенствование систем, технологии и механизации при подземной разработке мощных рудных месторождений». Госгортехиздат, 1963.

2. Абрамсон М. Г., Перегудов А. А. Шарошечные долота ВНИИБТ для бурения взрывных скважин. Труды ВНИИБТ, вып. V. Госгортехиздат, 1962.

3. Абрамсон М. Г., Харламов Т. Ф. Технико-экономические показатели бурения взрывных скважин на подземных рудниках СССР. Горный журнал, № 5, 1963.

4. Абрамсон М. Г. Исследование режимов работы штыревых долот диаметром 76—112 мм при бурении в крепких абразивных породах. Труды ВНИИБТ, вып. XIV. Изд-во «Недра», 1965.

5. Абрамсон М. Г., Перегудов А. А., Оспнов Г. М. и др. Повышение показателей работы шарошечных долот на открытых горных работах. Горный журнал, № 1, 1967.

6. Абрамсон М. Г., Перегудов А. А. Опыт применения шарошечных долот на открытых горных работах. Сб. «Усовершенствование технологии бурения и взрывания скважин на открытых горных работах». ЦИИНЦМ, 1966.

7. Албаров З. Б. Сравнение шарошечного бурения с бурением погружными пневмоударниками. Горный журнал, № 11, 1961.

8. Андреев А. В., Назаров В. П., Славский В. М. Результаты промысловых испытаний долот с опорами скольжения при бурении гидроударниками. Машины и нефтяное оборудование, № 2, ЦНИТЭнефтегаз, 1965.

9. Белаш М. Е., Постников Е. А. О режимах бурения взрывных скважин шарошечным способом. Труды ВНИИЦВЕТМЕТ, № 4, Металлургиздат, 1959.

10. Буткин В. Д. Исследование основных параметров режима шарошечного бурения взрывных скважин на открытых горных разработках, 1964.

11. Буткин В. Д., Телешев А. С., Брюхов Б. Ф. Зависимость показателей работы шарошечных долот от режима бурения. Горный журнал, № 10, 1964.

12. ВНИИБТ. Временная инструкция по эксплуатации шарошечных долот для бурения взрывных и других скважин в горной промышленности и при строительстве инженерных сооружений. Гостоптехиздат, 1964.

13. Воздвиженский Б. П., Васильев М. Г. Буровая механика. Госгеолтехиздат, 1954.

14. Воздвиженский Б. И., Скорняков А. Л. Бурение взрывных скважин. Госгортехиздат, 1960.

15. Гельфгат Я. А. и др. К вопросу установления некоторых эмпирических зависимостей показателей работы долот от параметров режима бурения в промысловых условиях. Труды ВНИИБТ, вып. IX. Гостоптехиздат, 1964.

16. Кулачок М. И. Исследование шарошечного бурения на карьерах Соколовско-Сарбайского комбината. Горный журнал, № 10, 1964.

17. Кутузов Б. Н., Михеев И. Г., Домаховский А. В. Влияние расхода сжатого воздуха на эффективность шарошечного бурения. Горный журнал, № 4, 1965.

18. Корнеев К. Е., Палий П. А. Буровые долота. Справочник. Изд-во «Недра», 1965.

19. Касаткина М. И. Долота с комбинированным вооружением в горнорудной промышленности. Труды ВНИИБТ, вып. XIII. Изд-во «Недра», 1964.

20. Лопатин Ю. С., Дюков Н. Г., Карлов Р. Г. Горный журнал, № 2, 1967.

21. Лактионов А. Т. Основы теории и техники бурения скважин с очисткой забоя воздухом или газом. Гостоптехиздат, 1961.

22. Минин А. А. и др. Техника беструбного бурения скважин. Гостоптехиздат, 1956.

23. Наринский И. Э., Оганов Г. М. Опыт применения электробура в горнорудной промышленности. Труды ВНИИБТ, вып. XI. Гостоптехиздат, 1964.

24. Павлова Н. Н., Шрейнер Л. А. Механизм разрушения горных пород и некоторые вопросы проектирования долот для твердых, хрупких и пластично-хрупких пород. Труды института нефти АН СССР, т. 11. Гостоптехиздат, 1958.

25. Перегудов А. А. Влияние конструктивных особенностей штыревых шарошечных долот на эффективность их работы. Бурение, № 11, 1965.

26. Перегудов А. А., Мокшин А. С., Дюков Н. Г., Осипов Г. М. Штыревые шарошечные долота для бурения в крепких, вязких абразивных породах. Труды ВНИИБТ, вып. XVII. Изд-во «Недра», 1966.

27. Пятковский П. И. Основные направления в развитии современной техники шарошечного бурения на открытых разработках США. Уголь, № 5, 1966.

28. Потапов Ю. Ф., Симонов В. В. Разрушение горных пород трехшарошечными долотами малого диаметра. Гостоптехиздат, 1961.

29. Романов А. З., Любимов Б. Г., Эдельман Я. А. Бурение с применением газообразных агентов вместо промывочной жидкости. ЦНИИТЭнефть, 1956.

30. Суханов А. Ф. и др. Определение оптимальных режимов шарошечного бурения в крепких малоабразивных породах на карьерах. Горный журнал, № 3, 1965.

31. Симкин Б. А., Лопатин Ю. С. Выбор оптимального режима бурения шарошечными станками на карьерах. Уголь, № 9, 1963.

32. Следаюк П. Е. Некоторые итоги работы железорудной промышленности за семилетие. Горный журнал, № 1, 1966.

33. Филиппов Г. С., Лукьянов А. Н. Исследование режимов шарошечного бурения в крепких породах. Горный журнал, № 6, 1966.

34. Федоров В. С. Научные основы режимов бурения. Гостоптехиздат, 1951.

35. Филатов Е. С., Макурин Н. М., Абрамсон М. Г., Кирсанов А. И. Бурение геологоразведочных скважин с продувкой воздухом. Над-во «Недра», 1964.

36. Шацов Н. И., Рыбаков Ю. Ф. Бурение скважин с продувкой воздухом или газом за рубежом. Гостоптехиздат, 1961.

37. Шрейнер Л. А., Павлова Н. Н. Механизм разрушения твердых горных пород и новые типы шарошечных долот. Нефт. хоз., № 4, 1954.

38. Шрейнер Л. А. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1958.

39. Шрейнер Л. А., Гань-Чжи-цзянь. Влияние числа оборотов на скорость бурения шарошечными долотами. Нефт. хоз., № 12, 1956.

40. Besigk H. Beitrad zur Kentnis der Arbeitweise von Rollenmeisseln. Erdöl und Kohle, Nr. 6, 1950.

41. Бобо Р. А. и др. Пути к увеличению скоростей проводки скважин. World Oil, 140, № 4, 1955.

42. Docker E. A., Woods H. B. Weight (Speed) penetration. J. Petroleum Engineering, v. 30, No 1, 1958.

43. Eckel J. E. How rotary speed penetration rate. Oil and Gas J., v. 55, No 47, 1957.

44. Excavating Engineer, № 4, 5, 9, 1963; № 3, 5, 1964; № 10, 11, 12, 1965.

45. Фиш Б. и др. Влияние абразивного износа при вращательном бурении. Bulletiun on The Institution of Mining and Metallurgy, v. 68, No 8, 1958—1959.

46. Garnier A. F., Van Lingen N. M. Phenomena affecting drilling rates at depth. J. Petroleum Technology, v. 11, No 9, IX, 1959.

47. Кеннингхем Р. А. Влияние большой скорости вращения долота на сокращение срока его службы и повышение стоимости бурения 58, № 28, 1960. Перевод ГОСИНТИ № 219/60Б, 1960.

48. Coal Age, № 2, 1951.

49. Coal Mine Modernization, Overburden Preparation at Enos Mine, 1951.

50. The Composite catalog of oil field and pipe eine equipment, 1961—1962; 1964—1965; 1966—1967.

51. Макги Э. Пути снижения стоимости бурения. Oil and Gas J., v. 61, No 41, 1963.

52. Maurer W. C. The «Perfect-Cleaning» Theory of Rotary. J. Petroleum Engineering, v. 14, No 11, 1962.

53. The Mining Journal, v. 256, No 3, 1961.

54. The Mining Congress J., № 4, 1964; № 8, 10, 1965.

55. Nicolson R. M. Air and Gas Drilling. J. Petroleum Engineering, v. 26, 1954.

56. Payne L. L., Woods H. B. Bit records show progress in drilling more hole for fewer dollars. Oil and Gas J., v. 59, No 45, 1961.

57. Roberg J. A. Two years of air drilling ova buted. World Oil, v. 145, No 1, 2, 1957.

58. Роулп Д. С. и др. Лабораторные исследования работы долот промышленных размеров. J. Petroleum Technology., v. 13, No 1, 1961. Перевод ГОСИНТИ № 2/62Б, 1962.

59. Read General Catalog., 1966—1967.

60. Rockbit type correlation, May, 1960.

61. Rotary drilling bits. Hughes tool Company, 1966.

62. Super-Aire blast Hole bits. Mining and Quarring General Catalog and drilling Guide.

63. Scott J. O. How to firure how air to put down the hole in air drilling. Oil and Gas J., v. 55, No 5, 1957.

64. Speer J. W. How to get the most hole for your moneg. Oil and Gas J., v. 56, No 13, 14, 1958.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Краткие сведения о горных породах, разбуриваемых на открытых и подземных работах . . . . . .
Глава II. Состояние техники бурения взрывных скважин на открытых и подземных горных работах . . . . . .
§ 1. Состояние техники бурения взрывных скважин на открытых горных работах . . . . . .
§ 2. Состояние техники бурения взрывных скважин на подземных горных работах . . . . . .
Глава III. Типы, размеры шарошечных долот и их основные конструктивные особенности . . . . . .
Глава IV. Геометрический расчет шарошечного долота . . . . . .
Глава V. Шарошечные долота для бурения в крепких и особо крепких хрупких абразивных горных породах . . . . . .
Глава VI. Шарошечные долота для бурения в абразивных твердых вязких породах . . . . . .
Глава VII. Шарошечные долота с комбинированным вооружением
Глава VIII. Вопросы технологии бурения взрывных скважин шарошечными долотами . . . . . .
§ 1. Влияние рабочего агента на показатели работы шарошечных долот . . . . . .
§ 2. О влиянии продолжительности работы шарошечных долот на текущее значение механической скорости бурения в крепких и особо крепких абразивных породах . . . . . .
§ 3. Влияние скорости вращения долота и осевой нагрузки на долото на механическую скорость бурения . . . . . .
§ 4. Зависимость проходки на долото и стойкости долот от параметров режима бурения . . . . . .
§ 5. К вопросу о распределении подводимого к долоту сжатого воздуха в продувочных устройствах долота . . . . . .
§ 6. Основные правила технической эксплуатации шарошечных долот при бурении взрывных скважин . . . . . .
Литература . . . . . .

Стр.

3

11

11

27

40
52

113

145
157

165

166

173

177

194

198

201
208

ШАРОШЕЧНЫЕ ДОЛОТА
ДЛЯ БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН

Перегудов Александр Алексеевич,
Абрамсон Михаил Григорьевич,
Андреев Александр Валерианович,
Дюков Николай Григорьевич

Редактор издательства *Н. А. Круглова*
Технический редактор *З. А. Болдырева*
Корректор *Л. И. Окрогло*

Сдано в набор 4/VII 1968 г. Подписано в печать 27/XII 1968 г.
Т-18842. Формат 60×90¹/₁₆. Печ. л. 13,5. Уч.-изд. л. 14,24.
Бумага № 1. Индекс 1—3—1. Заказ 2134/768-5.
Тираж 2000 экз. Цена 90 коп.

Издательство «Недра». Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник»
Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР. Московский проспект, 91.

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НЕДРА» ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ В СВЕТ В 1969 г. НОВЫЕ КНИГИ ПО НЕФТИ И ГАЗУ

Бе́ркович М. Я. и др. ТЕХНОЛОГИЯ БУРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН. 25 л. Ц. 1 р. 08 к.

В учебнике освещены новейшие достижения в области технологии бурения нефтяных и газовых скважин.

Рассмотрены механические свойства горных пород, режимы бурения, бурильный инструмент. Большое внимание уделено промывочным жидкостям.

Описаны различные виды осложнений, методы предупреждения и ликвидации поглощений, нефтегазопроявлений, прихватов.

Наложены основы разобщения пластов, вскрытия и опробования продуктивных горизонтов.

Приведены основные технико-экономические показатели, дан краткий обзор развития техники и технологии бурения в СССР и за рубежом.

Учебник предназначен для студентов нефтяных факультетов небуровых специальностей.

Книга представит интерес для инженерно-технических работников, занятых бурением нефтяных и газовых скважин.

Булатов А. И. и др. ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯ В СКВАЖИНАХ И БОРЬБА С НИМИ. 20 л. Ц. 1 р. 31 к.

В книге рассмотрены актуальные вопросы, связанные с газопроявлениями — наиболее опасными осложнениями при бурении скважин.

На основании теоретических и экспериментальных исследований, а также анализа производственных материалов дана оценка условий, сопутствующих газопроявлениям.

Подробно рассмотрены газопроявления при бурении скважин в зависимости от температуры, давления, свойств промывочной жидкости, положения бурильной колонны.

Наложены особенности крепления газовых и газоконденсатных скважин.

Описаны причины возникновения открытых фонтанов, предложены способы их ликвидации.

Приведен зарубежный опыт борьбы с газопроявлениями.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников нефтедобывающей и газовой промышленности, занятых строительством скважин.

Шумова З. П., Собкина И. В. СПРАВОЧНИК ПО ТУРБОБУРАМ. 15 л. Ц. 1 руб.

В справочнике приведены необходимые сведения по турбобурам, описаны особенности конструкций и сборки турбобуров различных типов.

Рассмотрен ремонт турбобуров, приведены размеры основных деталей турбобуров и условия использования деталей, бывших в работе.

Справочник предназначен для инженерно-технических работников нефтедобывающей и газовой промышленности, занимающихся эксплуатацией турбобуров, а также представляет интерес для студентов нефтяных вузов и факультетов.

Шустин Б. Г. ТАБЛИЦЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОЕКЦИЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИСКРИВЛЕНИЙ СКВАЖИН. 7 л. Ц. 39 коп.

Таблицы значительно упрощают и сокращают затраты времени на вычисление искривлений скважин. При этом исключаются операции выписывания значений синусов и косинусов, нахождения их значений по таблицам тригонометрических функций и умножения на арифмометре значений синусов и косинусов на соответствующие интервалы.

При пользовании таблицами достигается высокая точность работы. Они полностью гарантируют от случайных субъективных ошибок.

Таблицы предназначены для инженерно-технических работников геологической, горной и угольной промышленности.

Заказ на эти книги можно оформить в местных магазинах книготорга. При поступлении книг в продажу Вы будете извещены.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

90 коп.

НЕДРА · 1969