

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт горного дела, геологии и геотехнологий

институт

Горные машины и комплексы

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А.В. Гилев

подпись      инициалы, фамилия

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018г.

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

**21.05.04 «Горное дело»**

(специальность)

**21.05.04.09 «Горные машины и оборудование»**

(специализация)

Экспериментальные исследования прочностных и энергетических характеристик  
горных пород при их разрушении

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.О. Шигин

инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

С.А. Брянский

инициалы, фамилия

Консультанты:

Экономическая часть

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.Д.Бурменко

инициалы, фамилия

Безопасность

жизнедеятельности

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Н.М. Капличенко

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.О. Шигин

инициалы, фамилия

Красноярск 2018

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт горного дела, геологии и геотехнологий

институт

Горные машины и комплексы

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А.В. Гилев

подпись      инициалы, фамилия

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018г.

**ЗАДАНИЕ**

**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

**в форме дипломной работы**

Студенту Брянскому Сергею Анатольевичу

фамилия, имя, отчество

Группа ГМ12-13 Направление (специальность) 21.05.04 Горное дело

номер

код

специализация 21.05.04.09 «Горные машины и оборудование»

наименование

Тема выпускной квалификационной работы «Экспериментальные исследования прочностных и энергетических характеристик горных пород при их разрушении».

Утверждена приказом по университету № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Руководитель ВКР А.О. Шигин, доктор технических наук, профессор

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

кафедры «Горные машины и оборудование»

Исходные \_\_\_\_\_ данные \_\_\_\_\_ для

ВКР \_\_\_\_\_ Технические

характеристики бурового инструмента; строение породного массива;

методика расчета ресурса бурового инструмента

Перечень разделов ВКР 1. Режимы и условия эксплуатации шарошечных долот при бурении взрывных скважин; 2 Экспериментальные исследования прочностных и энергетических характеристик горных пород при их разрушении; 3. Экономическая часть; 4. Безопасность жизнедеятельности

Перечень Графического материала Слайды презентации

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_ А.О.Шигин

подпись

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_ С.А. Брянский

подпись

инициалы и фамилия студента

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 РЕЖИМЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ ПРИ БУРЕНИИ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН.....	6
1.1 Особенности эксплуатации шарошечных долот в зависимости от применяемых материалов .....	16
1.2 Исследование нагрузок, действующих на буровой инструмент при бурении сложноструктурных породных массивов.....	23
1.3 Исследование усталостной прочности как основного фактора стойкости шарошечных долот .....	33
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ.....	49
2.1 Экспериментальные исследования .....	49
2.2 Сопоставление экспериментальных результатов .....	65
3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	70
3.1 Сетевая модель выполнения работы.....	70
3.2 Смета затрат на изготовление стенда .....	82
3.3 Расчет заработной платы рабочих.....	83
4 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ .....	86
4.1 Правила безопасности при проведении экспериментов .....	86
4.1.1 Требования к конструкции установки и ее отдельным частям.....	87
4.2 Инструкция по безопасности.....	88
4.2.1 Требования безопасности перед началом работ.....	89
Требования безопасности во время работы: .....	90
Требования безопасности по окончании работ.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	97

## ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность на современном этапе характеризуется интенсивным развитием открытого способа разработки полезных ископаемых.

Этот способ добычи полезных ископаемых как наиболее производительный, экономичный и безопасный занимает ведущее место в горнодобывающей промышленности. Буровзрывные работы находят все более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Оставаясь основным средством отделения от массива и дробления горных пород при добыче полезного ископаемого, буровзрывные работы успешно применяются при строительстве плотин и выемок различного назначения, при разведке полезных ископаемых, при исследовании строения земной коры, при проходке нефтяных и газовых скважин, в машиностроении для сварки металлов, упрочнения и штамповки деталей и т.д. В общем технологическом комплексе производственных процессов горного предприятия буровзрывные работы определяют производительность погрузочно-транспортного оборудования и в конечном итоге себестоимость добываемой продукции.

Бурение трещиноватой и слоистой породы характеризуется значительными ударными нагрузками при прохождении шарошечным долотом трещин или границ между слоями породы с различными физико-механическими свойствами. Скачки напряжений при бурении трещиноватых пород наиболее высоки по сравнению со скачками напряжений при прохождении долотом других видов структурных элементов сложноструктурного массива. При бурении сложноструктурных пород с неизменными параметрами режима бурения снижается стойкость буровых долот в 2 и более раз.

В данном дипломном проекте предлагаются экспериментальные исследования прочностных и энергетических характеристик горных пород при их разрушении.

## **1 РЕЖИМЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ ПРИ БУРЕНИИ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН**

Одним из основных способов подготовки горных пород к выемке на открытых горных работах является дробление пород взрывом. Поэтому существенное влияние на трудоемкость добычи и себестоимость полезных ископаемых, добываемых открытым способом, оказывают буровзрывные работы. Для успешного осуществления этих работ необходимо дальнейшее внедрение мощных и высокопроизводительных буровых станков с более совершенным буровым инструментом. К ним относят, прежде всего, станки шарошечного бурения, которыми выполняют основной объем бурения взрывных скважин. В качестве бурового инструмента на этих станках используются шарошечные долота. В небольших объемах используются режущие долота и коронки для пневмоударного бурения, имеется опыт использования комбинированных режуще-шарошечных долот, а также инструмента для огневого бурения. Техничко-экономические показатели процесса бурения взрывных скважин на карьерах в значительной степени зависят от конструкции бурового инструмента и соответствия его горнотехническим условиям.

Разные типы долот оказывают оптимальное разрушающее воздействие на соответствующие породы.

Долота типа К и ОК характеризуются ударным действием вооружения на разрушаемый забой. Шарошки долот имеют чистое качение по забою без проскальзывания, а вооружение состоит из цилиндрических твердосплавных зубков со сферической головкой.

Долота типа ТК и Т характеризуются ударно-скалывающим действием вооружения на разрушаемый забой. Шарошки этих долот имеют кинематические схемы, обеспечивающие чистое качение с небольшим проскальзыванием основного

конуса по поверхности забоя. Поэтому твердосплавные и фрезерованные зубья наносят по забою удары с некоторым сдвигом по ходу вращения шарошек. Шарошечные долота типа Т и ТК образуют забой выпуклой формы.

Долота типа СТ и С характеризуются скалывающим действием вооружения на разрушаемые породы. Их шарошки имеют многоконусную форму самоочищающегося типа и работают по кинематической схеме, обеспечивающей качение со значительным проскальзыванием основных конусов шарошки вдоль поверхности забоя. Оси шарошек смещены относительно оси долота на 2–3 мм в зависимости от размеров долота, поэтому вооружение шарошек, состоящее из твердосплавных зубков и фрезерованных зубьев, наносит по забою наклонный удар со значительным сдвигом по ходу их вращения.

Шарошечные долота типа СТ и С образуют забой выпуклой формы. Для предохранения долот от износа по диаметру обратные конусы шарошек также наплавляются твердым сплавом релитом. Область применения твердых сплавов, из которых изготавливаются вставки-штыри бурового инструмента, выпускаемые ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов», приведены в таблице 1.1, где перечислены вольфрамкобальтовые сплавы: среднезернистые ВК-ВК и крупнозернистые ВК-КС. Цифровой индекс в обозначении марки сплава указывает на процентное содержание кобальта.

*Особенности узлов шарошечных долот.* Устройство шарошечного долота, подшипниковых узлов, а также номенклатура деталей долота с твердосплавными вставками и фрезерованными зубьями представлены на рисунке 1 – 1.3.

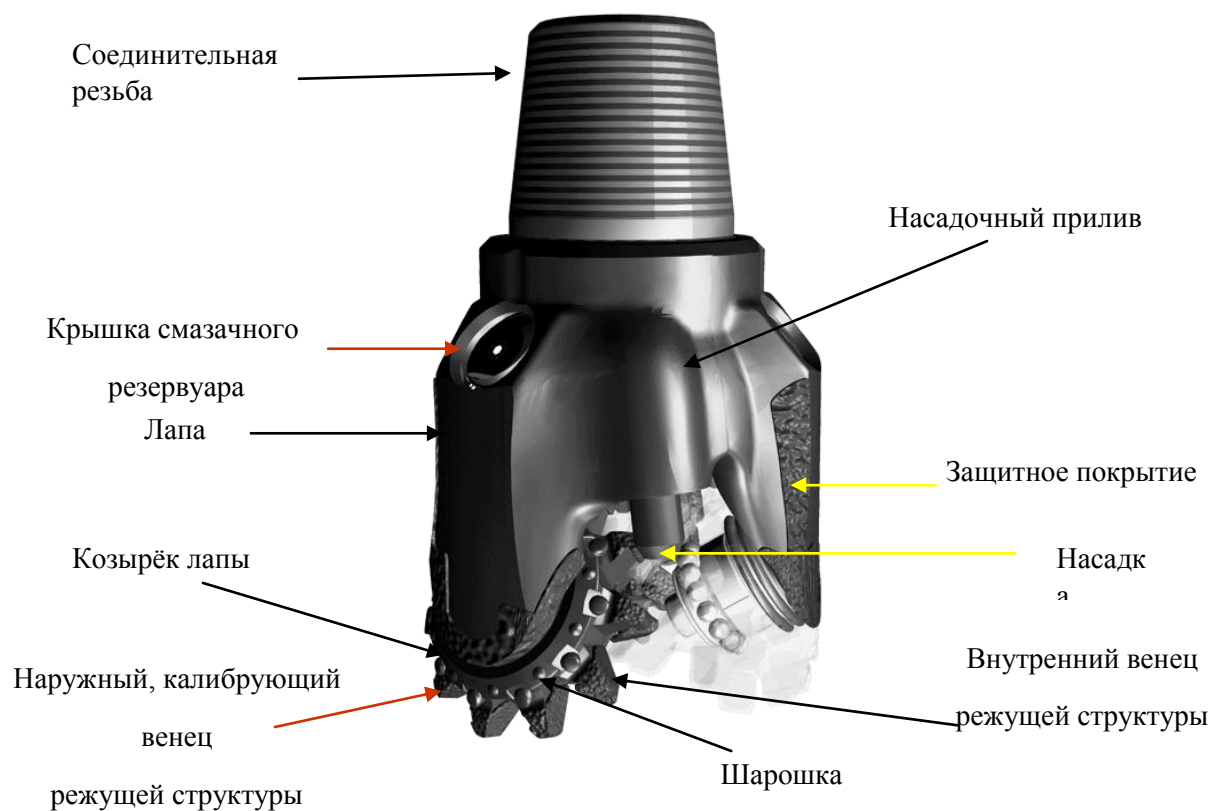


Рисунок 1 - Устройство шарошечного долота

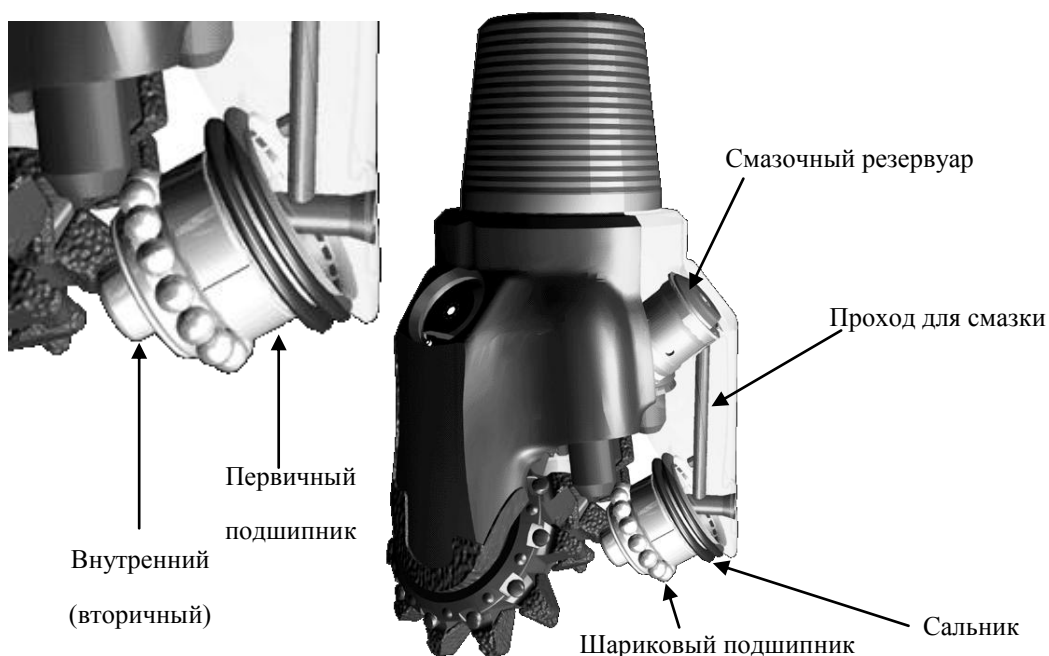


Рисунок 1.1 - Устройство подшипниковых узлов шарошечного долота



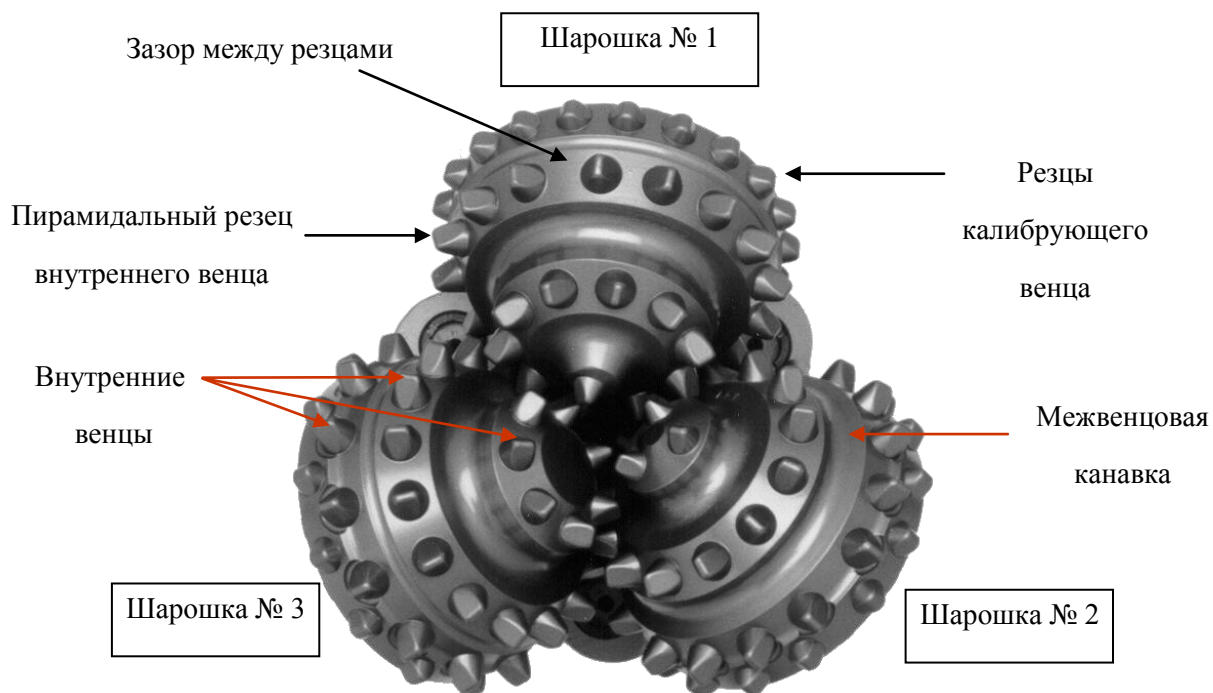


Рисунок 1.2 - Номенклатура деталей долота с твердосплавными вставками

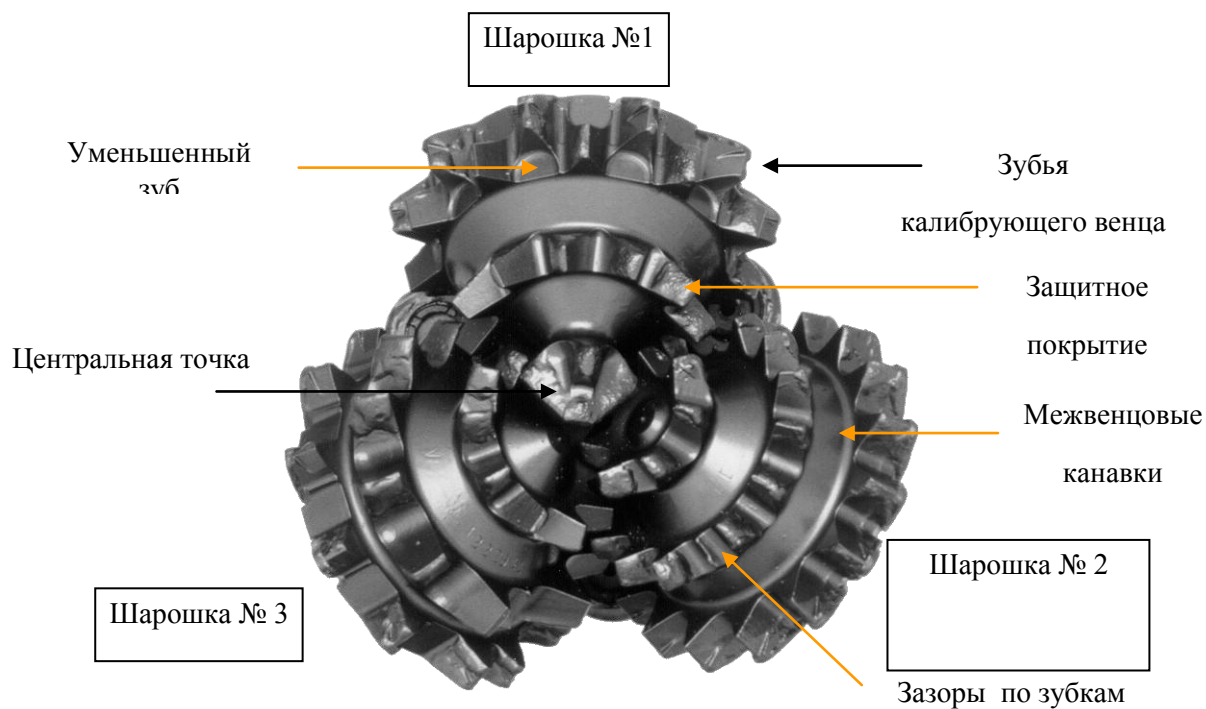


Рисунок 1.3 - Номенклатура деталей долота с фрезерованными зубьями

Для долот, предназначенных для бурения пород с различными физико-механическими свойствами, характерен различный угол наклона шарошек (рисунки 1.4, 1.5). Он определяется как угол между линией, перпендикулярной к оси шарошки и вертикальной осью долота.

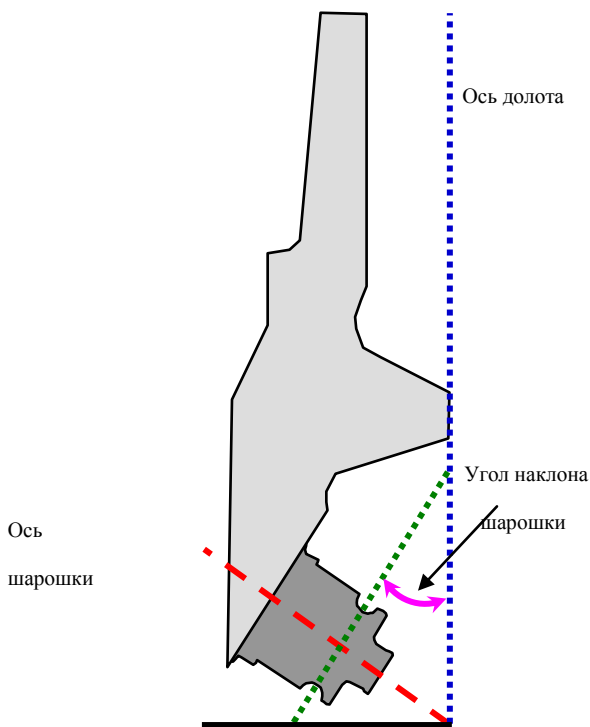


Рисунок 1.4 - Угол наклона шарошек

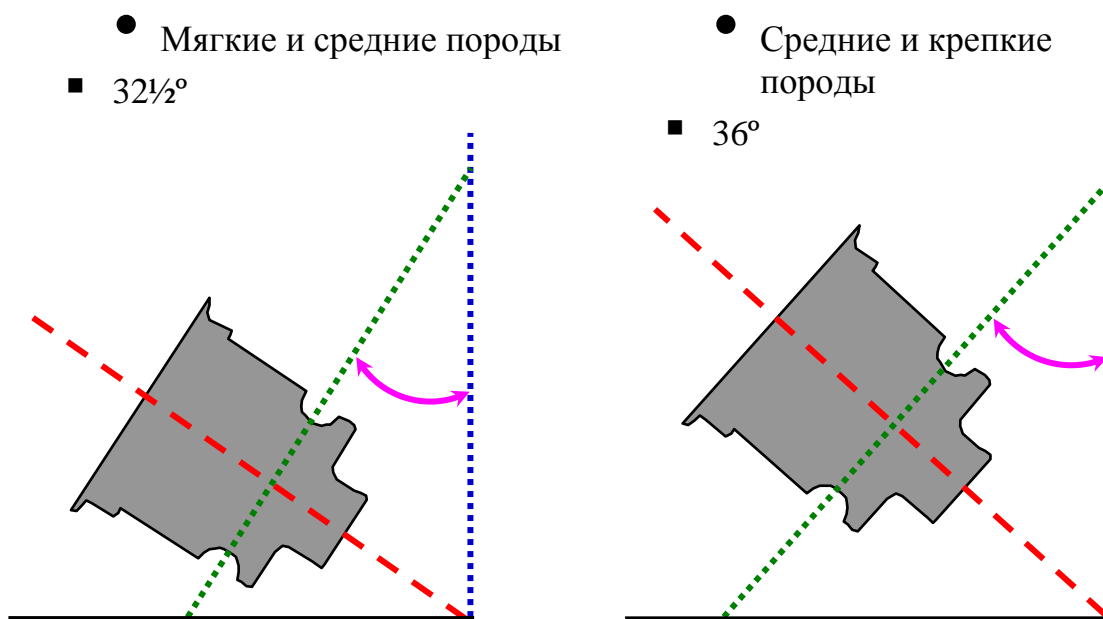


Рисунок 1.5 - Угол наклона шарошек – для мягких и крепких пород

*Подшипниковые узлы.* Основные типы подшипников – это роликовый и фрикционный (рисунок 1.6). Роликовый подшипник обычно используется в долотах большого диаметра. Его также называют подшипником низкого трения. Устройство подшипника качения представлено на рисунках 1.7, 1.8. Устройство подшипника скольжения представлено на рисунках 1.9, 1.10.

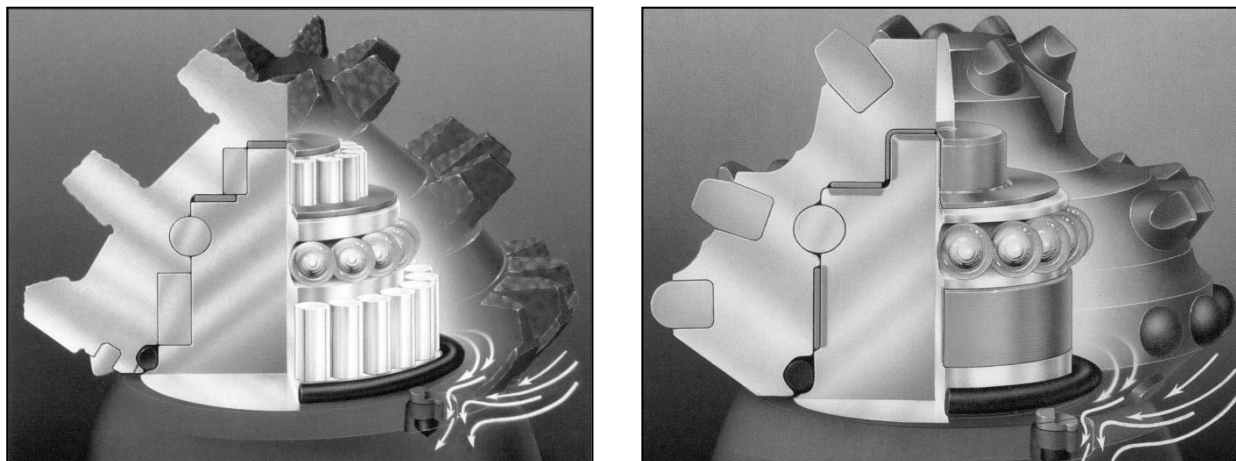


Рисунок 1.6 - Подшипниковые узлы

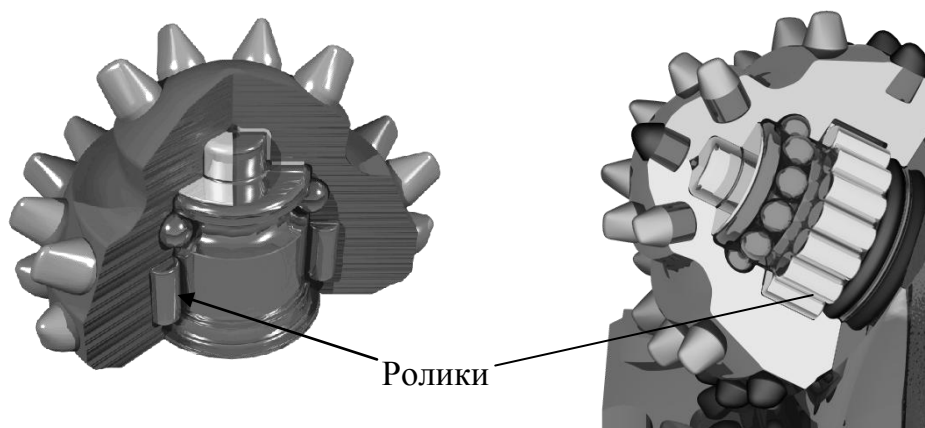


Рисунок 1.7 - Устройство опоры качения шарошки

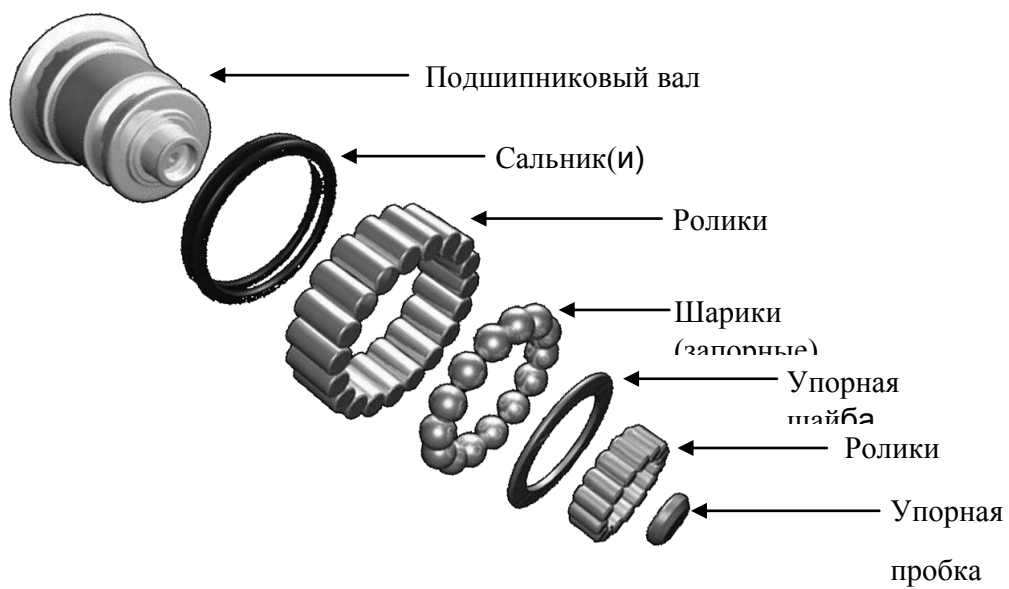


Рисунок 1.8 - Составные части роликового подшипника

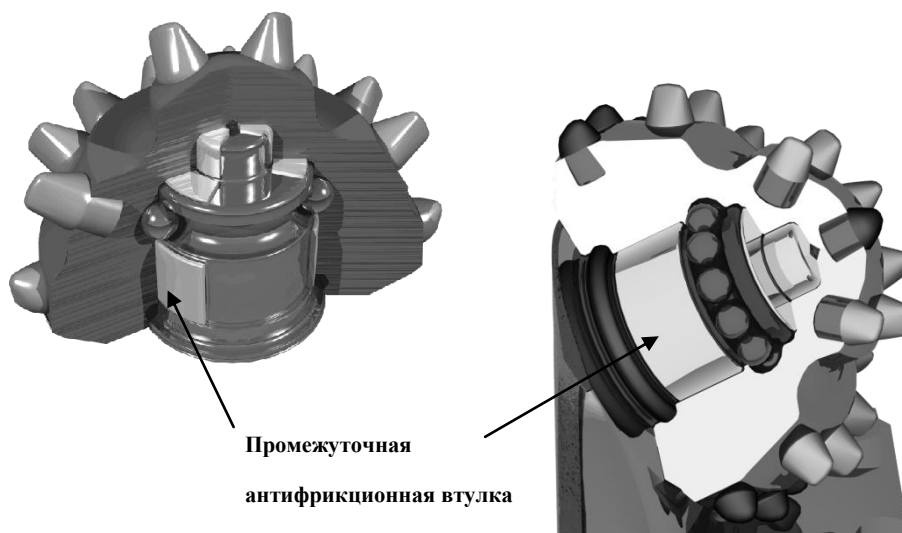
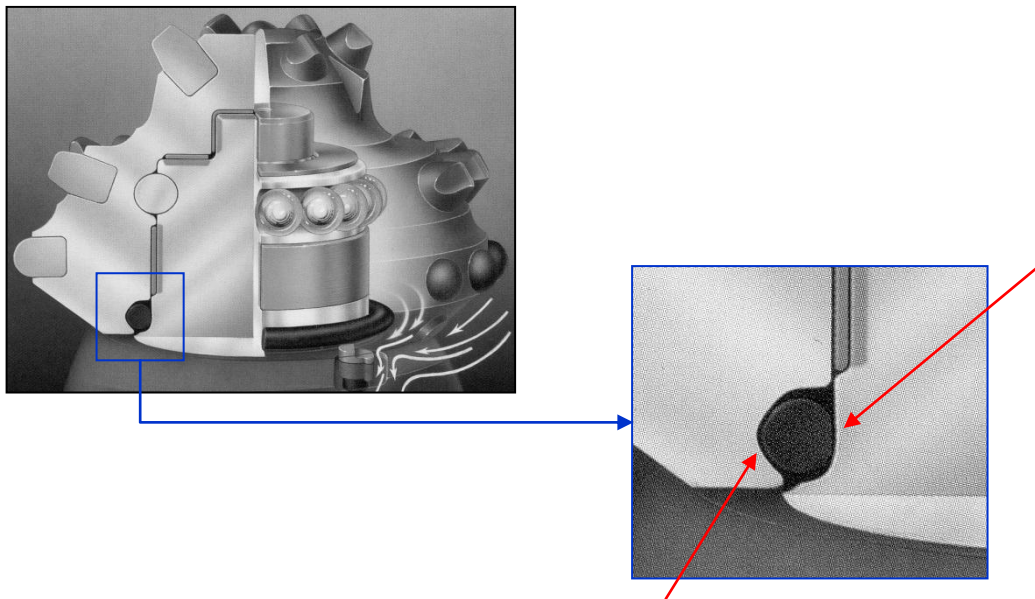


Рисунок 1.9 - Подшипник скольжения



### Рисунок 1.10 - Составные части фрикционного подшипника

Для увеличения защиты от попадания абразивных частиц в подшипниковые узлы шарошки применяются сальниковые уплотнения (рисунок 1.11). Они имеют две основные функции: защита от проникновения посторонних частиц во внутреннюю полость подшипника и предотвращение потери смазки.



**Шарошка-сальник – статика**

### Рисунок 1.11 - Расположение сальника в теле шарошки

Режущие структуры шарошечных долот имеют различные характеристики в зависимости свойств горной породы, количества венцов и зубьев. Режущие структуры шарошечных долот с твердосплавными вставками показаны на рисунке 1.12.



Очень мягкие



Мягкие



Средне-мягкие



Средне-твёрдые



Твёрдые



Очень крепкие



10 венцов / 92 резца



11 венцов / 114 резцов



12 венцов / 120 резцов



12 венцов / 125



14 венцов / 144



17 венцов / 180

Рисунок 1.12 - Режущие структуры шарошечных долот

При бурении сплошным забоем горная поверхность разрушается, и образуется шлам с различной крупностью частиц. Для того чтобы избежать повторного дробления шлама – шламовых подушек, увеличения ресурса зубьев

и опор шарошечного долота, а также для получения максимальной механической скорости. Схема образования бурового шлама представлена на рисунке 1.13.

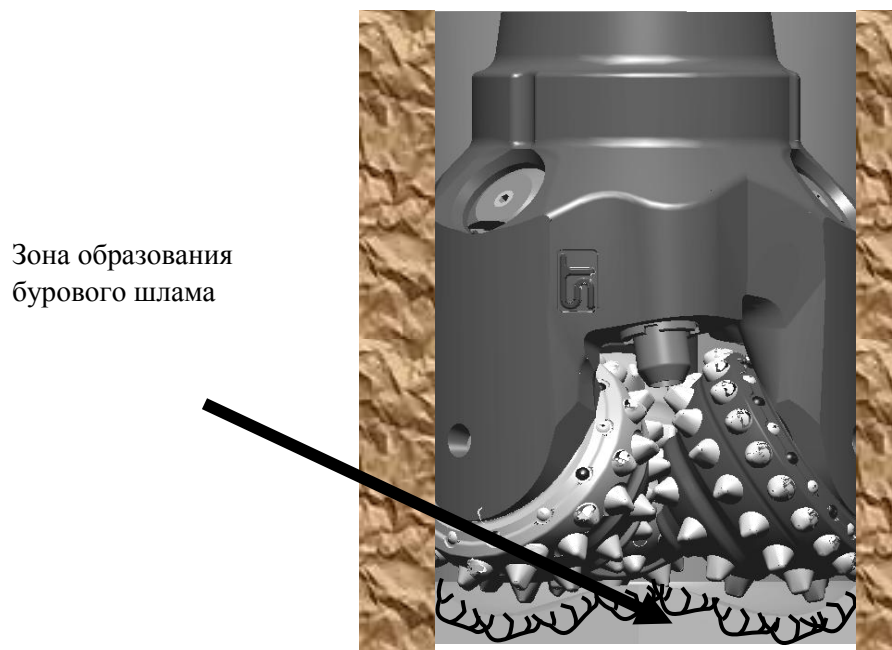


Рисунок 1.13 - Схема образования бурового шлама

Типичная картина кратера разрушения представлена на рисунок 1.13.

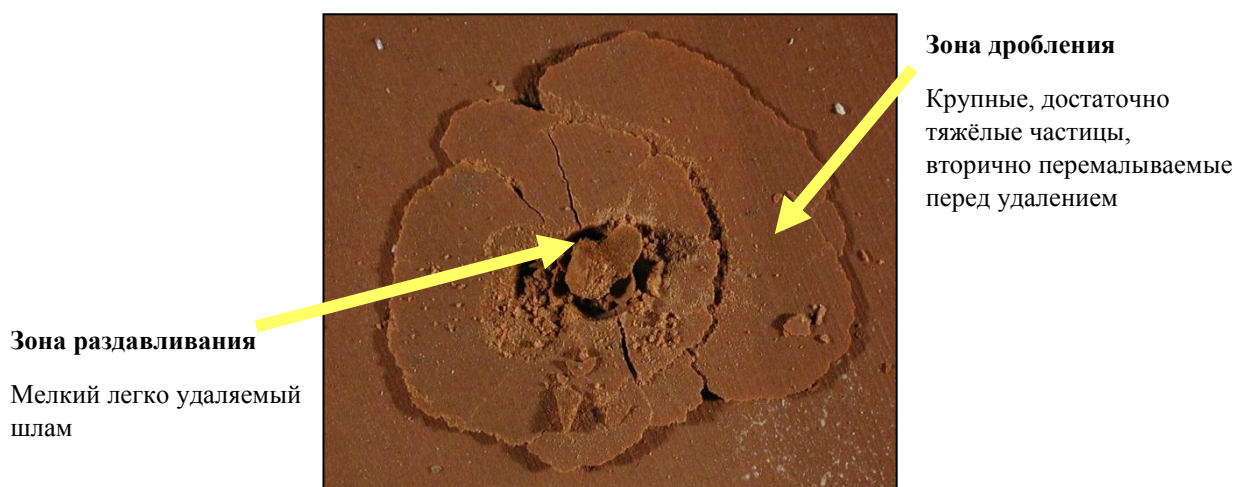


Рисунок 1.14 - Кратер разрушения горной породы при бурении шарошечным  
ДОЛОТОМ

## 1.1 Особенности эксплуатации шарошечных долот в зависимости от применяемых материалов

Тяжелые горнотехнические условия работы инструмента (гидроабразивная среда, высокие режимные параметры) обуславливают делать выбор материала для изготовления каждого элемента долота дифференцированно [2].

В настоящее время существует множество заводов-изготовителей, предлагающих заказчику большое разнообразие инструмента. Доминирующим и зарекомендовавшим себя на рынке производителем шарошечных долот является ОАО «Волгабурмаш». Для изготовления долот различных типоразмеров на ОАО «Волгабурмаш» применяются разные стали (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Стали, применяемые для изготовления долот ОАО «Волгабурмаш»

Наименование деталей	Диаметр долота, мм	Марка стали	Номер технических условий
Шарошка	< 187,3	17НЗМА-Ш 17НЗМА-ВД 16ХНЗМА-ВД 18ХНЗМА	3-938-75
	190,5		14-1-8-71
	215,9-295,3 311,1		14-1-8-71
	и более		3-850-74
Лапы	< 187,3	14ХНЗМА-Ш 14ХНЗМА-ВД 142НЗМА	3-938-75
	190,5-295,3 311,1		14-1-8-71
	и более		3-850-74
Шары и ролики	всех размеров	55СМ5ФА-ЩД	14-14-71

ОСТ 26-021315-84 предусматривает для изготовления лап и шарошек долот достаточно широкий ассортимент сталей (таблица 1.2) [3].

Таблица 1.2 - Стали для изготовления лап и шарошек по ОСТ 26-02-1315-84

Наименование детали	Диаметр долота, мм	Марка стали	Номер ТУ
Шарошка	46,0-212,7	17НЗМА-ША	ТУ 3-938-79
	215,9-295,3	16ХНЗМА-Ш	ТУ 3-938-79
	311,1 и более	17ХНЗМА-Ш	ТУ 33859-80
Лапа	46,0-151,0	14ХНЗМА-Ш	ТУ 3-938-79
	158,7-212,7	22ХГНМА-Ш	ТУ 3-35-79
	215,9	22ХГНМА	ТУ 3-35-79
	222,3-295,3	14ХНЗМА-Ш	ТУ 3-938-79



	311,1 и более	22ХГНМА-Ш 14ХНЗМА 14Х2НЗМА	ТУ 3-35-79 ТУ 3-850-80
Долото с опорой качения			
Шарошка	112,0-190,5	17НЗМА-Ш	ТУ 3-938-79
	215,9-295,3	16ХНЗМА-Ш	ТУ 3-938-79
	311,1 и более	16ХНЗМФА 18ХНЗМА	ТУ 3-195-83 ТУ 3-850-80
Лапа	112,0-190,5	14ХНЗМА-Ш	ТУ 3-938-79
	215,9-295,3	14ХНЗМА-Ш	ТУ 3-938-79
	311,1 и более	14ХНЗМФА	ТУ 33-19583
		14ХНЗМА 14Х2НЗМА	ТУ 3-850-80

В связи с тем, что одной из основных причин отказов шарошечных долот является износ подшипников шарошек [4,5], серьезное внимание при изготовлении бурового инструмента уделяется материалам для производства тел качения. Стали для них производятся методом электрошлакового переплава с последующей термической обработкой до получения твердости HRC = 54-58. Для изготовления подшипников качения шарошечных долот применяются стали, состав которых приведен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Химический состав сталей для изготовления тел качения, %

Марка стали	С	Мп	Si	Ni	Cr	Mo	S	P
55СМА	0,5-0,6	0,3-0,5	0,8-1,0	<0,3	<0,3	0,4-0,6	0,03	0,03
50ХН	0,45-0,55	0,5-0,8	<0,35	1,0-1,5	0,45-0,75	-	0,03	0,03
55СМА-1	0,53-0,6	0,3-0,6	0,8-1,0	<0,3	<0,3	0,4-0,6	0,025	0,025
55СМ5ФА								
-Ш-Д	0,53-0,6	0,3-0,6	0,5-1,1	<0,3	<0,3	0,4-0,6	0,015	0,025

На практике наиболее широко используют сталь 55СМ5ФА-Ш-Д, выплавляемую с использованием электрошлакового и вакуумно-дугового переплава. Ролики из этой стали термо обрабатывают до твердости HRC = 55-57, а шарики - до твердости HRC - 54-56. Тела качения сортируют по группам с размерностью в одной группе для роликов 0,01 мм, для шариков 0,005 мм.

Для повышения долговечности вооружения бурового инструмента применяют твердые сплавы. Фрезерованные зубья шарошечных долот для

предотвращения абразивного изнашивания наплавляют твердым сплавом: релитом «З» зерновым (при наплавке с нагревом током высокой частоты) или релитом «ТЗ» трубчато-зерновым (при наплавке ацетиленокислородным пламенем). Вооружение штыревых шарошечных долот осуществляется зубками из металлокерамического твердого сплава.

Твердосплавные зубки запрессовывают в тело шарошки с определенным натягом. Зубки имеют три основные разновидности, в соответствии с ГОСТ 880-75: зубки формы Г-26 с полусферической формой рабочей поверхности, изготавливаются из твердого сплава ВК8К; зубки формы Г-25 с клиновидной головкой, изготавливаются из твердого сплава ВК11ВК, и зубки формы Г-54 цилиндрические для армирования тыльного конуса шарошек и спинок лап и клиновые наклонные для шарошечных долот специального назначения. Эти зубки изготавливают из твердых сплавов ВК4В и ВК6В [10,11- 14].

В настоящее время в России эксплуатируются шарошечные долота для горнорудной отечественного производства ОАО «Волгабурмаш», ОАО «Уралбурмаш», ряда новых заводов, Дрогобычского завода (Украина). В последнее десятилетие на российском рынке стали появляться долота иностранных фирм (таблица 1.4). Сравнительный ряд шарошечных долот приведен в таблице 1.5 [6].

Таблица 1.4 - Шарошечные долота иностранных фирм

Другие фирмы	Долота производства САНДВИК							
	TSS	TS	TM	TH	CSS	CS	CM	CH
Бейкер Хьюз	TS	TM	TH	TVH	BH50	BH60	BH 70	BH 80
Секьюрити	S3S	S4T	M4H	H7	SS6M SS8M	S8M M8M	H8M	H10M
Смит	QSS	QM	QM	QH	Q2J Q3J	Q4J Q5J	Q7J	Q9J
Варел	V3S V3M	V2	VH2	VH1	QMC9 QMC7	QMC77 QMC78	QMC6 QMC6S	QMCH QMC3
Томсон	T4	T3	T2	T1-H	S,E,52-54	S,E,56-57	S,E,58	S,E,59
Уокер Макдоналдс	M3	M2	M1	M1H	M51 M52	M53 M62	M72 M74	M81 M83
Цукамото	3SS	MH	3MH	3HS	A-30	A-40	A-60	A-80

(TSK)							A-70	A-90
-------	--	--	--	--	--	--	------	------

Шарошечные долота эксплуатируются в крайне тяжелых горнотехнических условиях (гидроабразивная среда, высокие режимные параметры).

Таблица 1.5 - Сравнительный ряд шарошечных долот

Тип долота		Горные породы			Классификация профессора Протодяконова		
Сандвик 1	СНГ	Прочность, Мпа	Коэффициент абразивности	Буримость	Крепость	Степень крепости	Коэффициент крепости
<b>Фрезерованные зубья</b>							
TSS	M	15-20	1.5<	I- III	VIA	мягкие	1.0-1.5
TSS	M3	20-30	1.5<	II- III	VI	мягкие	1.5-2.0
TSS	MC	30-40	1.5<	III- IV	VA	довольно мягкие	2.0-3.0
TSS/TS	MC3	40-50	1.7<	IV	V	довольно мягкие	3.0-4.0
TS	C	50-60	1.7<	IV-V	V-IVA	средней крепости	4.0
TS/TM	C3	60-70	2.0<	IV-V	IVA-IV	средней крепости	4.0-5.0
TM	CT	70-80	2.0<	V - VI	IV-IIIА	довольно крепкие	6.0
TH	T	80-90	2.0<	VI-VII	III	довольно крепкие	7.0-8.0
<b>Твердосплавные вставные зубки</b>							
CSS3-CS3	T3	70-90	>3.0	VI-VII	III	крепкие	7.0-8.0
CSS1-CS1 CSS2-CS2 CSS3-CS3 CS1-CM1	TK	90-110	1.0< 2.0< 3.0< 1.0<	VI-VIII	III-II	крепкие	8.0-10.0
CS2-CM2 CS3-CM3	TK3	110-150	2.0< 3.0<	VII-IX	III-II	весьма крепкие	10.0-12.0
CM1- CMH1 CM2- CMH2 CM3- CMH3	K	150-210	1.0< 2.0< 3.0<	IX-X	II	очень крепкие	12.0-15.0
CMH1 CMH2 СМЫЗ	OK	210-270	1.0< 2.0< 3.0<	XI-XII	I	чрезвычайно крепкие	15.0-18.0
CH1 CH2 CH3	OK	270-600	1.0< 2.0< 3.0<	XI-XII	I	чрезвычайно крепкие	18.0-20.0

Факторами, определяющими рациональный режим бурения, являются осевые усилия на долото, частота вращения инструмента и условия удаления

разрушенной породы из забоя скважины. Режимные параметры зависят не только от крепости породы, но и от типа и диаметра долота [7-9].

Для шарошечных буровых долот отечественного производства эта зависимость представлена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Рекомендуемые параметры режима бурения шарошечными долотами третьего поколения

Диаметр долота, мм	Наружный диаметр бурильных труб, мм	Осевое усилие на долото, кН		Частота вращения, с <sup>-1</sup>		Расход продувочного агента	
		М,С, Т,ТК	МЗ,ТЗ, К,ОК	М,С, Т,ТК	МЗ, ТЗ, К, ОК	сжатый воздух, м <sup>3</sup> /с	воды*, дм <sup>3</sup> /с
Долота на подшипниках качения *							
146	89-114	60-80	80-100	2,5-2	2-1	0,16-0,2	-
161	127	100-130	130-150	2,5-2	2-1	0,25	-
215,9	180	140-180	160-200	2,5-1,3	2-0,83	0,42	<0,02*
244,5	203	180-220	180-250	2,5-1,3	2-0,83	0,42-0,53	<0,03
269,9	219	200-270	250-300	2,5-1,3	2-0,83	0,6-0,7	<0,05
320	273	<350	<500	2,5-1,3	2-0,83	0,83-1,0	<0,06
Долота на подшипниках скольжения							
76	63,5	<30	<40	<2,5	<2	0,15	<0,01
98,4	73	<40	<60	<2,5	<2	0,15	< 0,02»
112	89	<50	<80	2,5-1,7	2,5-1,0	0,15	< 0,02*
146	89-114	<80	<120	2,5-1,0	2,5-1,0	0,15	<0,03
161	127	120-140	130-150	2-1,0	1,7-1,0	0,25	<0,03
215,2	180	160-200	160-220	2-1,0	1,7-0,83	0,42	<0,05
244,5	203	200-250	220-270	2-1,0	1,7-0,83	0,42-0,53	<0,05
269,9	219	220-270	250-320	2-1,0	1,7-0,83	0,6-0,7	<0,06

Примечания. 1. Верхние пределы осевых усилий на долото соответствуют нижним пределам частот вращения долот. 2. В высшей степени крепких абразивных или сильнотрещиноватых породах частоту вращения рекомендуется уменьшать до 1 с<sup>-1</sup>. 3. По мере изнашивания вооружения шарошек долот М, С, Т, ТК необходимо постепенно увеличивать осевое усилие до верхнего предела. \*Продувка воздушно-водяной смесью.

Для зарубежных шарошечных долот (фирма «Бейкер-Хьюс», США) рекомендуемые режимные параметры незначительно отличаются от режимных параметров, рекомендуемых для эксплуатации отечественного бурового инструмента (таблица 1.7).

Таблица 1.7 - Рекомендуемые режимные параметры для трехшарошечных долот фирмы «Бейкер-Хьюс» (США)

Вид вооружения и тип долота	Тип буримой породы формации		Допустимые на долоте	
			нагрузка, кН/мм	частота вращения, мин <sup>-1</sup>
Фрезерованный зубец	S	Мягкая, слабоабразивная	0,18-0,54	120-70
	M	Средней крепости и абразивности	0,22-0,9	100-60
	H	Твердая, среднеабразивная	0,72-1,26	80-40
Твердосплавный зубец	VH50	Довольно мягкая, слабоабразивная	0,18-0,72	150-50
	VH60	Средней крепости и абразивности	0,36-0,9	120-50
	VH70	Абразивная, средней крепости и крепкая	0,54-1,08	90-50
	VH80	Очень крепкая и крепкая	0,90-1,44	80-50

Стоимость буровых работ вскрыши и добыче полезных ископаемых на Горевском горно-обогатительном комбинате приведена в таблице 1.8.

Таблица 1.8 - Себестоимость буровых работ по добыче полезного ископаемого на Горевском Горно-обогатительном комбинате.

№ п/п	Наименование статей	Сумма затрат, руб.	Стоимость 1 пог. м, руб./м	Доля затрат, %
1	Зарплата	5343603	27,94	12,20
2	Амортизация	10000500	52,3	22,84
3	Электроэнергия	6356645,28	33,24	14,52
4	Смазочные материалы	10971,98	0,06	0,03
5	Шарошечные долота	20070000	104,95	45,84
6	Ремонт оборудования	2000100	10,46	4,57
Итого:		43781820,26	228,95	100

На рисунке 1.16 представлено распределение затрат на бурение в условиях Горевского горно-обогатительного комбината

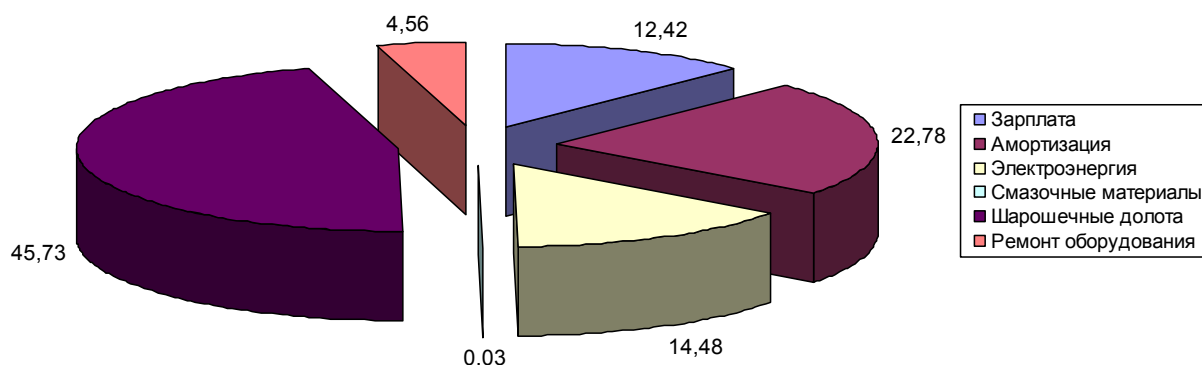


Рисунок 1.16 - Стоимость буровых работ вскрышных пород на Горевском Горно-обогатительном комбинате

На рисунке 1.16 видно, что расход на ШД в себестоимости составляет основную часть затрат на бурение, а это значит, что снижение затрат на буровые работы связано, в первую очередь, с необходимостью уменьшения расходов на шарошечные долота.

В таблице 1.9 приведены основные причины отказов вращающегося оборудования.

Таблица 1.9 - Причины отказов вращающегося оборудования

1 Дефекты изготовления	2-10 %
2 Естественный износ	5-25 %
3 Дефекты монтажа	10-50 %
4 Ошибки при текущем обслуживании и ремонте	10-50 %
5 Эксплуатация с нарушением требований ТУ	5-70 %

Шарошечные долота являются дорогостоящим инструментом с разным сроком службы его элементов, а доля затрат на бурение и буровой инструмент составляют 20 - 40 %, а в отдельных условиях превышают 50 %. Поэтому стали появляться в продаже шарошечные долота иностранных производителей, например, США, но большим спросом пользуются отечественные.

## 1.2 Исследование нагрузок, действующих на буровой инструмент при бурении сложноструктурных породных массивов

В процессе работы буровой инструмент сталкивается с пластами горной породы, имеющими разные мощность и физико-механические свойства. Рудное тело представляет собой пластообразную залежь, протягивающуюся по простиранию на 600 м при мощности от 20 до 80 м, по классификации проф. М.М. Протодяконова руды и вскрышные породы месторождения относятся к довольно крепким, крепким и очень крепким ( $f = 8-18$ ) (рисунок 1.17).

Крепость по данной шкале находится в прямой зависимости от предела прочности горной породы при одноосном сжатии  $\sigma_{сж}$  [2]:

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{100},$$

где  $f$  – коэффициент крепости по шкале Протодяконова;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности горной породы при одноосном сжатии, МПа.

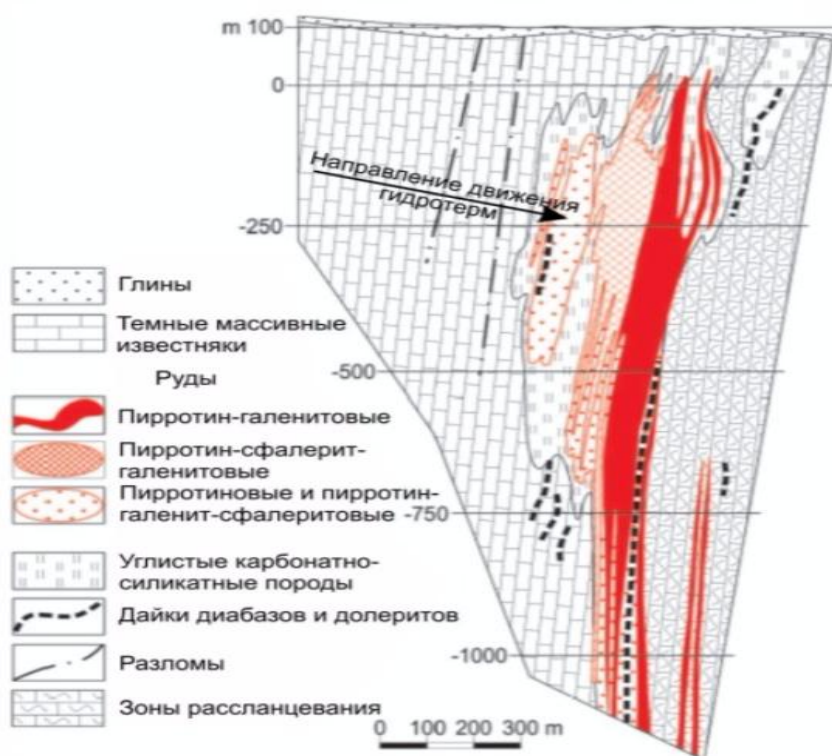


Рисунок 1.17 - Общий разрез Горевского месторождения.

При разрушении горной породы шарошечным долотом кроме одноосного сжатия присутствуют сдвиговые напряжения. Кроме того, на процесс бурения влияет также плотность горной породы. В связи с этим более полно сопротивление горной породы разрушению отражает показатель буримости [12].

Бурение горной породы с чередующимися слоями, имеющими разную крепость, характеризуется возникновением ударной нагрузки. Удар, как правило, вызывает повышение напряжения в зонах контакта бурового инструмента с породой, в подшипниковых узлах и соединительных элементах всего рабочего органа бурового станка. Буровой инструмент выходит из строя при разрушении различных его элементов. Однако в 80 % случаев шарошечный буровой инструмент отказывает в работе по причине разрушения подшипниковых узлов [6].

Средние нагрузки, как показывает практика, с достаточной точностью соответствуют расчетным значениям усилий и мощности машины. Однако для эффективной эксплуатации горных машин необходимо знать зависимость их мгновенной нагрузки от определяющих факторов. Неравномерность мгновенной нагрузки определяется как случайная функция времени. Предугадать колебания нагрузки полностью невозможно даже при наличии подробного анализа структуры породы. Так или иначе, но возникают случайные включения породы разной крепости, которые незначительно влияют на теоретическую скорость проходки. Но на практике данные включения обязательно влияют не только на скорость бурения, но и на напряженное состояние бурового инструмента. В частности, периодическое возникновение ударов создает циклическую нагрузку, что приводит к усталостному разрушению элементов инструмента.

Для оценки опасности ударных нагрузок необходимо определить уровень напряжения, возникающего при ударе. Ударная нагрузка, с одной стороны характеризуется уровнем энергии, которая обеспечивает продвижение бурового



инструмента через горную породу. С другой стороны, ударная нагрузка характеризуется изменением физико-механических свойств породы. Таким образом, уровень энергии, которая обеспечивает продвижение бурового инструмента через горную породу, характеризуется мощностью, передаваемой от привода подачи к рабочему органу и буровому инструменту,

$$N = \frac{A}{t} = \frac{\Delta E}{t} = \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2t}, \quad (1.1)$$

где  $N$  – мощность, передаваемая от привода подачи к буровому инструменту бурового станка с учетом КПД привода подачи, Вт;  $\Delta E$  – изменение кинетической энергии при продвижении бурового инструмента через породу, Дж;  $m$  – эквивалентная масса, характеризующая массу рабочего органа и энергию подающего привода, кг;  $v_1, v_2$  – скорости равномерного продвижения бурового инструмента при бурении породы 1 и 2 с соответствующими физико-механическими свойствами, м/с (здесь порода 2 имеет показатель буримости больше чем порода 1);  $t$  – время переходного процесса, т. е. период, за который скорость подачи бурового инструмента изменяется от значения 1 до значения 2 (рисунок 1.18).

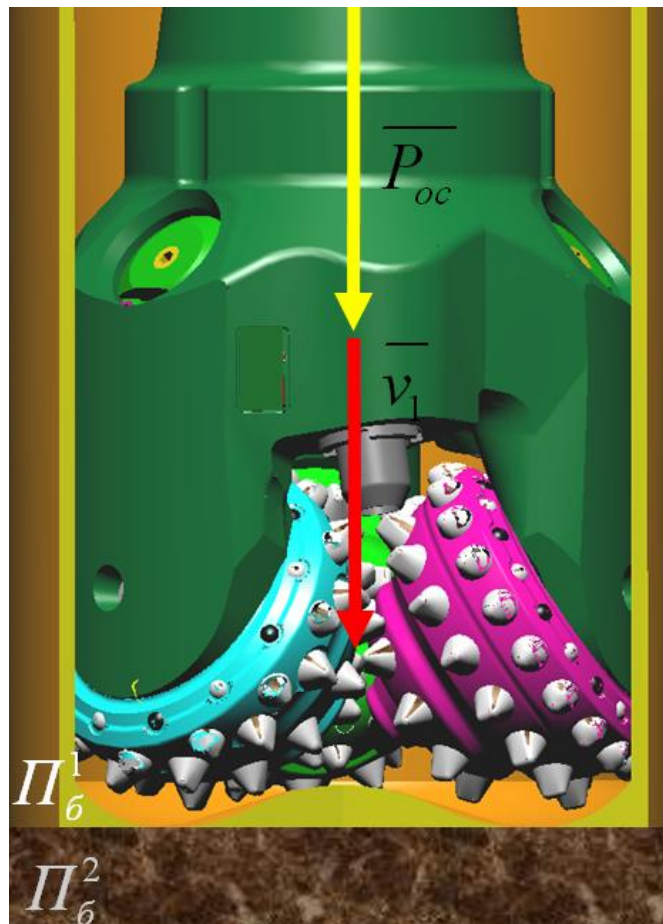


Рисунок 1.18 - Схема бурения трехшарошечным долотом при переходе бурового инструмента на слой горной породы с большим показателем буримости  $\Pi_6^2 > \Pi_6^1$ .  $P_{oc}$  – осевое усилие,  $v_1$  – скорость бурения породы с показателем буримости  $\Pi_6^1$ .

Изменение скорости продвижения бурового инструмента через горную породу при переходе на породу с большим показателем буримости характеризует дополнительное напряжение, возникающее при ударе,

$$\sigma_{уд} = \frac{F}{S} = \frac{m(v_2 - v_1)}{S \cdot t}, \quad (1.2)$$

где  $\sigma_{уд}$  – напряжение, возникающее в металле при ударе, МПа;  $S$  – площадь контактной поверхности в подшипниковых узлах или других элементах, воспринимающих полностью нагрузку удара,  $\text{мм}^2$ .

Выразив эквивалентную массу из уравнений (1.1) и (1.2), приравняем их и определим напряжение, возникающее при переходе бурового инструмента на

поруду с более высоким показателем буримости:

$$\sigma_{уд} = \frac{(v_2 - v_1) \cdot 2N \cdot t}{S \cdot t \cdot (v_2^2 - v_1^2)},$$

или

$$\sigma_{уд} = \frac{2N}{S \cdot (v_2 + v_1)}.$$

С учетом выражения

$N = P_{ос} \cdot v_1$ , предложенного проф. Р. Ю. Подэрни [10], получим

$$\sigma_{уд} = \frac{2P_{ос} \cdot v_1}{S \cdot (2v_1 - \Delta v)}, \quad (1.3)$$

где  $P_{ос}$  – осевое усилие, Н;  $\Delta v$  – изменение скорости при переходе бурового инструмента на более крепкую породу, м/мин;  $v_1$  – скорость бурения до перехода бурового инструмента на более крепкую породу.

Согласно работе [13] максимальное напряжение в ролике подшипника качения

$$\sigma_p^{max} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}}.$$

Максимальное напряжение в шарике подшипника качения

$$\sigma_{ш}^{max} = 1800 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_{ш}^2}},$$

где  $F_r$  – радиальное усилие, прилагаемое к подшипнику, Н;  $z$  – количество тел качения в подшипнике;  $D_p$  – диаметр ролика, мм;  $L_p$  – длина ролика, мм;  $D_{ш}$  – диаметр шарика, мм.

Тогда напряжение в ролике подшипника качения шарошки, возникающее

при ударе с учетом выражения (1.3),

$$\sigma_{\text{п.уд.}}^{\text{max}} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \cdot \frac{2v_l}{2v_l - \Delta v} \quad (1.4)$$

Напряжение в шарике подшипника качения шарошки, возникающее при ударе,

$$\sigma_{\text{ш}}^{\text{max}} = 1800 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_{\text{ш}}^2}} \cdot \frac{2v_l}{2v_l - \Delta v} \quad (1.5)$$

Скорость бурения находим из выражения [46]:

$$v = \frac{P_{\text{ос}} \cdot n_{\text{вр}}}{5\Pi_6 \cdot D_1^2}, \text{ м/мин,}$$

где  $P_{\text{ос}}$  – осевое усилие, МН;  $n_{\text{вр}}$  – частота вращения бурового става,  $\text{с}^{-1}$ ;  $D_1^2$  – диаметр долота, м.

$$\Pi_6 = 0,07 \cdot (\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{сдв}}) + 0,7\gamma,$$

где  $\Pi_6$  – показатель буримости;  $\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности горной породы при одноосном сжатии, МПа;  $\sigma_{\text{сдв}}$  – предел прочности горной породы при сдвиге, МПа;  $\gamma$  – плотность горной породы,  $\text{т/м}^3$ .

Предел прочности горной породы при сдвиге приблизительно определяется из выражения:

$$\sigma_{\text{сдв}} = 0,5 \cdot \sqrt{\sigma_{\text{сж}} \cdot \sigma_{\text{р}}}, \text{ МПа,}$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности горной породы при растяжении, МПа;  $\sigma_{\text{р}}$  – предел прочности горной породы при растяжении, МПа.

Если необходимо найти скорость бурения до удара  $v_l$ , то в расчете необходимо использовать показатель буримости породы, расположенной до перехода бурового инструмента на более крепкую породу.

Затем с учетом полученных выражений (1.4) и (1.5) были построены зависимости напряжения, возникающего в роликах опор качения трехшарошечного долота от удара, вызванного изменением физико-механических свойств породы и характеризуемого разностью скорости бурения соответствующих слоев породы (рисунок 1.19).

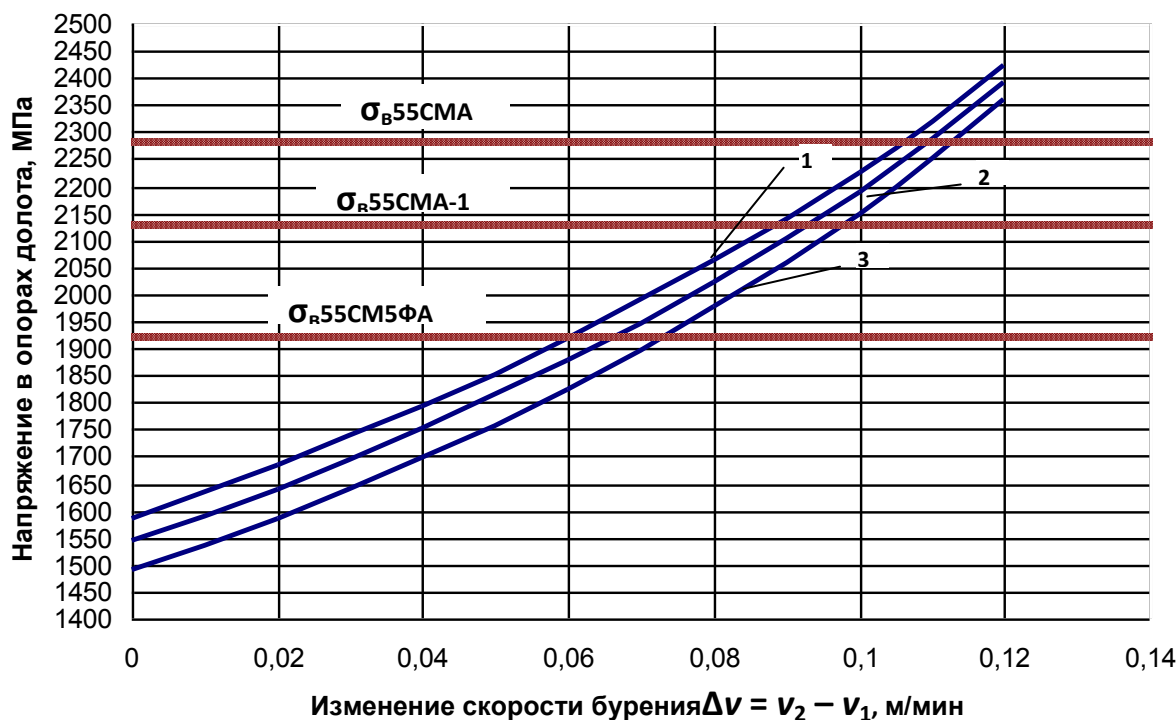


Рисунок 1.19 - Напряжение в роликах опор качения шарошек: 1– напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 215,9 мм при осевом усилии 160 кН; 2 – напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 244,5 мм при осевом усилии 200 кН; 3– напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 269,9 мм при осевом усилии 235 кН (минимальное напряжение соответствует бурению породы без ударов; кривые строились с показателем буримости 7,5; горизонтальные прямые показывают величину предела прочности при сжатии сталей 55СМ5ФА, 55СМА-1, 55СМА)

Выразим напряжение в опорах качения, возникающее при ударе через показатель буримости

для роликовых тел качения

$$\sigma_{p.уд}^{max} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \cdot \frac{2\Pi_6^I + 2\Delta\Pi_6}{2\Pi_6^I + \Delta\Pi_6}; \quad (1.6)$$

где  $\Pi_6$  – показатель буримости.

С использованием выражения (1.6) построены зависимости напряжения в роликах опор качения трехшарошечного долота, возникающего при ударе от величины изменения показателя буримости (рисунок 1.20, 1.21).

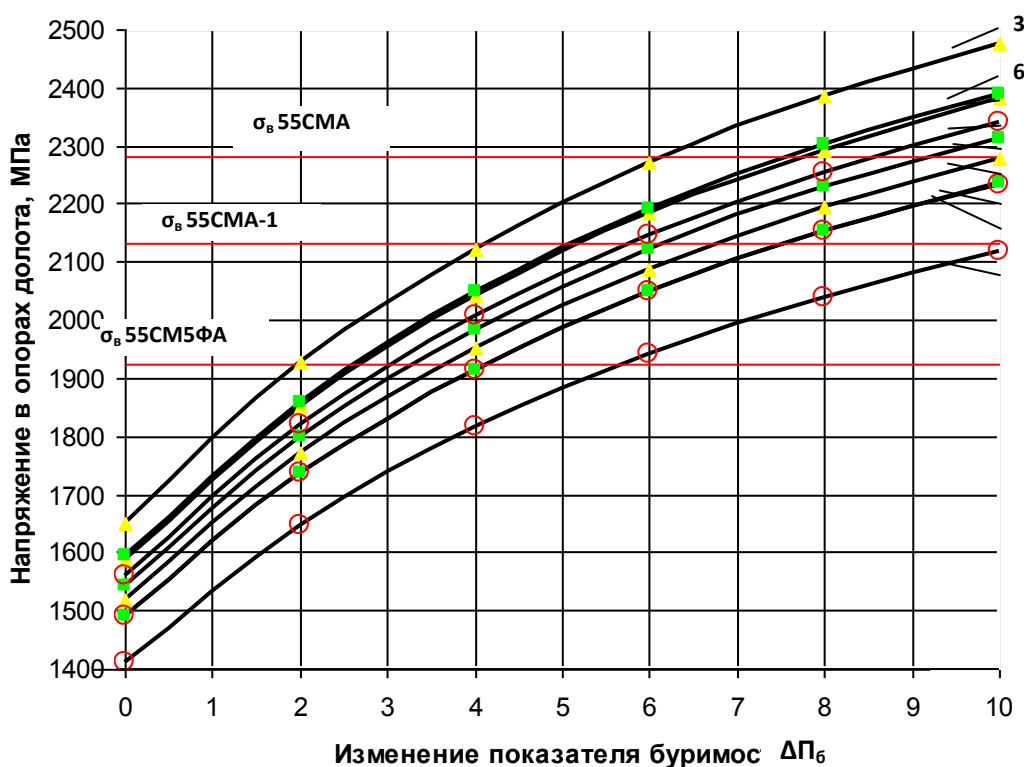


Рисунок 1.20 - Напряжения в роликах опор качения шарошек: кривые 1–3– напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 215,9 мм при осевом усилии 140, 160 и 180 кН; 4–6– напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 244,5 мм при осевом усилии 180, 200, 220 кН; 7–9– напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 269,9 мм при осевом усилии 200, 235, 270 кН

Минимальное напряжение (рисунок 1.20) соответствует бурению породы

без ударов. Кривые построены с показателем буримости  $\Pi_6 = 5$ . Горизонтальные прямые показывают величину предела прочности при сжатии сталей 55СМ5ФА, 55СМА-1, 55СМА.

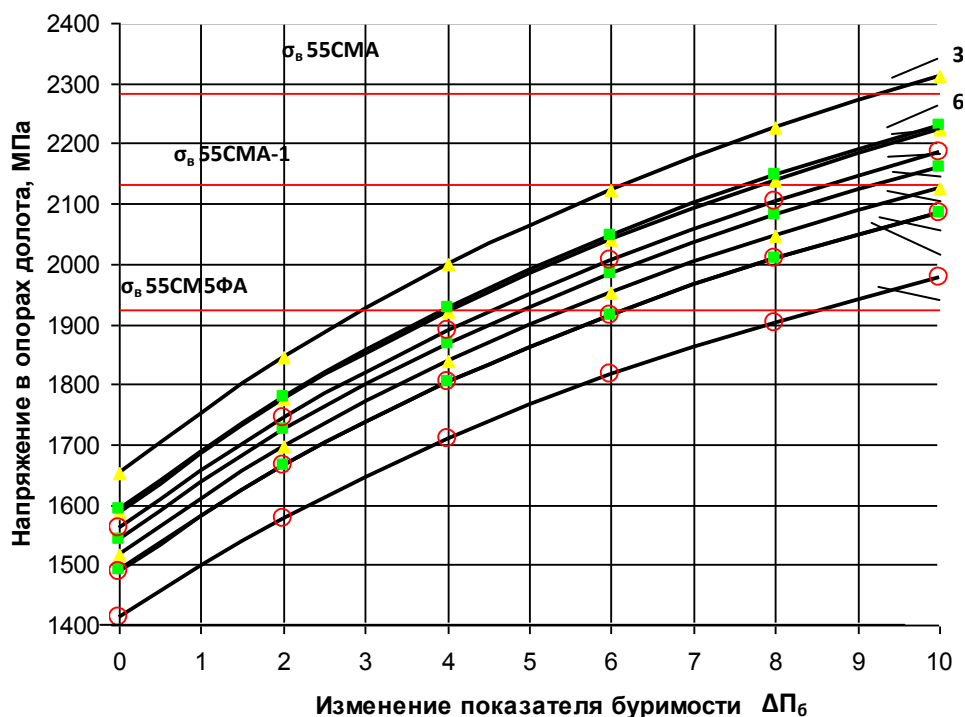


Рисунок 1.21 - Напряжения в роликах опор качения шарошек: кривые 1–3– напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 215,9 мм при осевом усилии 140, 160 и 180 кН; 4–6– напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 244,5 мм при осевом усилии 180, 200, 220 кН; 7–9– напряжения, возникающие в опорах шарошечного долота диаметром 269,9 мм при осевом усилии 200, 235, 270 кН

Минимальное напряжение (рисунок 1.21) соответствует бурению породы без ударов. Кривые построены с показателем буримости  $\Pi_6 = 7,5$ . Горизонтальные прямые показывают величину предела прочности при сжатии сталей 55СМ5ФА, 55СМА-1, 55СМА.

При нагружении шарошечного долота с тремя шарошками основную нагрузку воспринимают роликовые подшипники. Шариковые подшипники

выполняют роль запирающего механизма. Тела качения в шарошечных долотах изготавливают из высокопрочных конструкционных сталей, как правило, содержащих кремний и молибден. Их предел прочности находится в диапазоне 1 900– 2 300 МПа. Механические свойства данных сталей значительно зависят от режимов термической обработки. На рисунках 1.19– 1.21 показаны пределы прочности сталей, из которых изготавливаются тела качения шарошечных долот.

При условии бурения горной породы с показателем буримости  $P_6= 5$  (рисунок 1.21) и среднем подающем усилии максимально допустимая величина изменения показателя буримости породы  $[\Delta P_6]$  для сталей 55СМ5ФА; 55СМА-1; 55СМА будет следующей: для долот диаметром 215,9 мм  $[\Delta P_6]= 2,5; 5; 7,5$ ; для долот диаметром 244,5 мм  $[\Delta P_6] = 3,3; 6,2; 9,2$ ; для долот диаметром 269,9 мм  $[\Delta P_6]= 4,2; 7,5; >10$ .

При условии бурения горной породы с показателем буримости  $P_6= 7,5$  (рисунок 1.22) и среднем подающем усилии максимально допустимая величина изменения показателя буримости породы  $[\Delta P_6]$  для сталей 55СМ5ФА; 55СМА-1; 55СМА будет следующей: для долот диаметром 215,9 мм  $[\Delta P_6] = 4; 8; >10$ ; для долот диаметром 244,5 мм  $[\Delta P_6] = 5; 9,2; >10$ ; для долот диаметром 269,9 мм  $[\Delta P_6] = 6,2; >10; >10$ .

В связи с представленными результатами можно сделать следующие выводы:

- при бурении сложноструктурных пород, имеющих слои с разными показателями буримости, напряжение в различных элементах бурового инструмента зависит от первоначального уровня показателя буримости и величины прироста показателя буримости. Увеличение напряжения возникает при переходе на более крепкую породу и достигает до 50 % и более;

- увеличение напряжения зависит от отношения прироста показателя буримости к первоначальному значению показателя буримости. При условии



одинакового прироста показателя буримости напряжение будет больше в том случае, если первоначальное значение показателя буримости было меньше.

- предел прочности материала тел качения шарошечных долот при бурении сложноструктурных пород должен быть на 50 % больше напряжения, возникающего в телах качения шарошечных долот при бурении породы с неизменным значением показателя буримости 5–7,5.

### **1.3 Исследование усталостной прочности как основного фактора стойкости шарошечных долот**

При бурении горных пород буровой инструмент и буровой став испытывают спектр сложных нагрузок. Наиболее сложным механическим узлом бурового става является буровой инструмент. С одной стороны, его детали испытывают сложнейшие по структуре и величине нагрузки, а с другой – он имеет ресурс, в основе которого лежат механические свойства материалов. В 80 % случаев шарошечный буровой инструмент (ШД) отказывает в работе по причине разрушения подшипниковых узлов [6].

Стойкость шарошечных долот в среднем на 80 % зависит от количества циклов до разрушения подшипников качения [30, 33]. При анализе актов наработки на отказ за 2010 – 2011 гг. шарошечных долот типа ТКЗ и ТЗ диаметрами 215,9 и 244,5 мм производителей «ГОРМАШ», «УРАЛБУРМАШ», «ATLASCOPCO» и «GLUBUR» в условиях Мазульского известнякового рудника в качестве характера поломки почти в 100 % случаев отмечен износ подшипников. При анализе наработки на отказ за 2006 – 2010 гг. шарошечных долот типа ТКЗ диаметрами 215,9 и 244,5 мм производителей «ГОРМАШ», «УРАЛБУРМАШ», «ATLASCOPCO» в условиях ЗАО «Полюс» в качестве характера поломки долота более чем в 95 % случаев отмечен износ подшипников.

Подшипники качения шарошек испытывают сложную циклическую нагрузку: 1) циклическую нагрузку на тело качения подшипника при качении

шарошки по забою; 2) циклическую нагрузку при перекачивании шарошки с зубка на зубок; 3) циклическую нагрузку, характеризующуюся изменением физико-механических свойств горной породы.

1. Циклическая нагрузка на тело качения подшипника при качении шарошки по забою описывается уравнениями расчетного ресурса подшипника.

$$L = 10^6 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left( \frac{C}{P} \right)^k, \quad (1.6)$$

где  $L$  – расчетный ресурс подшипника, об.;  $a_1$  – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от надежности;  $a_2$  – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от особых свойств подшипника;  $a_3$  – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от условий работы подшипника;  $C$  – грузоподъемность подшипника, Н;  $P$  – нагрузка, Н;  $k$  – показатель степени, равный в соответствии с результатами экспериментов  $k = 3$  для шариковых и  $k = 10/3$  для роликовых подшипников.

Для подшипника шарошки расчетный ресурс следует измерять числом циклов нагружения.

В связи с особенностями конструкции опор качения шарошки Р-Ш-Р роликовые подшипники несут основную нагрузку, а шариковый подшипник служит замковым механизмом. Поэтому при учете осевых нагрузок особое внимание следует уделять расчету ресурса роликовых подшипников.

Указанные уравнения учитывают только циклическую нагрузку на тела качения подшипника за счет изменения геометрического положения тел качения. Ресурс опоры качения (1.6) не учитывает ударные нагрузки, возникающие при перекачивании зубьев шарошки по забою, и нагрузки, возникающие при переходе при бурении на горные породы с более высоким показателем буримости. Периодически возникающая ударная нагрузка требует оценки усталостной прочности. Достаточно надежной характеристикой усталостной

прочности деталей машин является коэффициент запаса усталостной прочности  $n_r$  [50]. Эта величина также характеризует уменьшение количества циклов опоры качения в зависимости от дополнительной циклической нагрузки. Отсюда ресурс подшипника с учетом дополнительной циклической нагрузки

$$L = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_H} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \sigma_m}, \quad (1.7)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости материала, МПа;  $\sigma_a$  – амплитуда переменных напряжений цикла, МПа;  $\sigma_B$  – предел прочности материала, МПа;  $\sigma_m$  – среднее напряжение цикла, МПа.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2},$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2},$$

где  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$  – максимальное и минимальное напряжение, возникающее при ударах при увеличении крепости горной породы, либо при перекачивании зубьев шарошки, МПа.

2. Циклическая нагрузка при перекачивании шарошки с зубка на зубок характеризуется ударными нагрузками, возникающими при ударе очередного зубка о поверхность забоя. Данный процесс характеризуется изменениями кинетической энергии и переходом последней в энергию механического удара. Изменения кинетической энергии бурового органа характеризуется изменением скорости. Средняя скорость движения бурового инструмента равна скорости бурения. Но при перекачивании шарошки в поверхность забоя поочередно ударяются зубки А, Б и В и шарошка вращается согласно направлению стрелки (рисунок 1.23).

При перекачивании с зубка А на зубок Б в первый полупериод высота  $h_1$

растет от 0 до  $x/2$ , а высота  $h_2$  убывает от  $x$  до  $x/2$ . В данный полупериод долото и буровой став относительно поверхности забоя перемещаются вверх и нагрузка на все узлы является пиковой. Во второй полупериод высота  $h_1$  растет от  $x/2$  до  $x$ , а высота  $h_2$  убывает от  $x/2$  до 0. В данный полупериод нагрузка снижается и мощность подающего привода преобразуется в кинетическую энергию. В конце второго полупериода кинетическая энергия преобразуется в энергию удара и нагрузка также является пиковой. В первый полупериод пиковая нагрузка передается плавно в течение всего полупериода. В конце второго полупериода кинетическая энергия преобразуется в энергию удара мгновенно и время передачи энергии равняется времени внедрения зубка в поверхность забоя. Отсюда нагрузка, возникающая в конце второго полупериода, является максимальной за весь период перекачивания с одного зубка на другой.

Ударное напряжение, возникающее при перекачивании зубьев шарошки по забою, характеризуется уровнем энергии, которая обеспечивает поочередное опускание зубьев шарошки на забой.

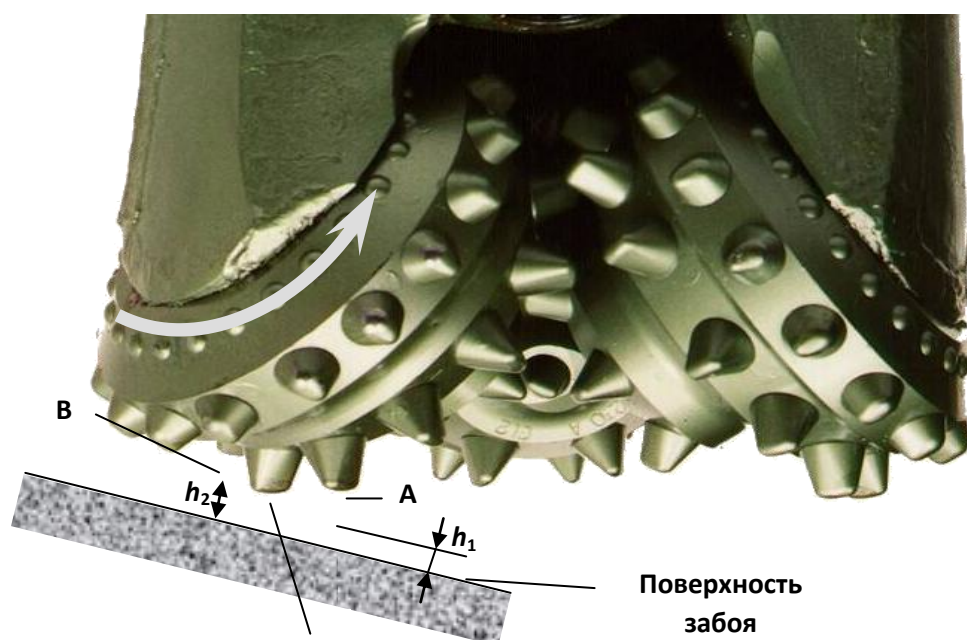


Рисунок 1.23 - Схема перекачивания шарошки по забою

Ударное напряжение, возникающее при увеличении крепости горной породы, характеризуется уровнем энергии, которая обеспечивает продвижение бурового инструмента через горную породу. А также ударная нагрузка характеризуется изменением физико-механических свойств породы.

Уровень энергии, которая обеспечивает продвижение бурового инструмента через горную породу, характеризуется мощностью, передаваемой от привода подачи к рабочему органу и буровому инструменту. Уровень энергии, с которой зубья шарошки опускаются на забой, характеризуется мощностью, передаваемой от привода подачи и привода вращения к рабочему органу (1.1). В случае с перекатыванием зубьев шарошки  $v_1$  – скорость отдельного зубца шарошки при  $h_2 = x/2$ , а  $v_2 = 0$ .

При оценке максимального напряжения, возникающего при опускании зубьев шарошки на забой, необходимо определить максимальную линейную скорость зубца, развиваемую при вращении шарошки. Данная скорость зависит от скорости вращения бурового става, от соотношения диаметра долота и диаметра окружности шарошки, на которой располагается  $i$ -й зубец. Сущность процесса движения шарошки в момент перекатывания заключается во вращении шарошки вокруг мгновенного центра вращения  $O$  (рисунок 1.24).

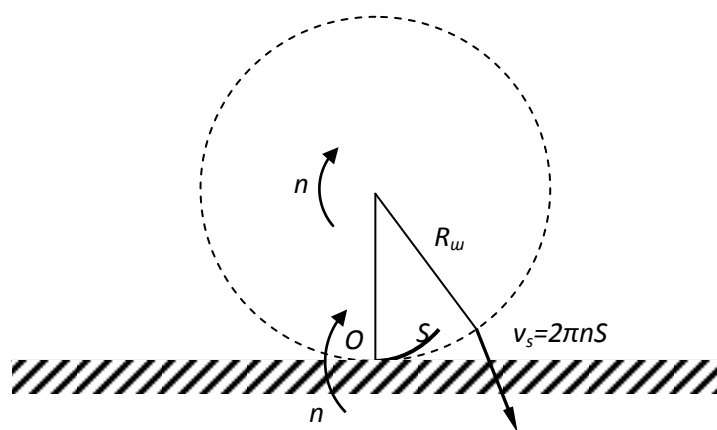


Рисунок 1.24 - Схема определения скорости опускания зубца шарошки на забой (точка  $O$  – мгновенный центр вращения;  $n$  – частота вращения шарошки, об/с;  $v_s$  – скорость опускания зубца шарошки на забой, м/с;  $S$  – расстояние между зубцами, м;  $R_w$  – средний радиус шарошки до конца зубцов, м)

Точкой О является крайняя точка зубца, на который опирается в данный момент шарошка и вокруг которой осуществляется вращение. Скорость вращения вокруг точки О, согласно законам теоретической механики, равна скорости вращения шарошки относительно центра шарошки п.

При большом числе зубцов справедливо выражение:

$$v_s = 30n_{\text{вр}} \frac{D_{\text{ш}} D_1}{2D_{\text{ш}}} \cdot \frac{S}{D_{\text{ш}}} = 15n_{\text{вр}} D_1 \cdot \frac{S}{D_{\text{ш}}},$$

где  $n_{\text{вр}}$  – частота вращения шарошечного долота, об/мин;  $D_1$  – диаметр шарошечного долота, м.

$$S = \frac{\pi D_{\text{ш}}}{k},$$

где  $D_{\text{ш}}$  – средний диаметр шарошки по всем окружностям зубцов, м;  $k$  – количество зубцов всех рядов шарошки.

Поскольку в процессе перекатывания участвуют все ряды зубцов шарошки, то в расчетах величина  $S$  является расстоянием между остриями всех зубцов шарошки  $k$  в плоскости проекции, перпендикулярной линии касания шарошки с поверхностью забоя.

Отсюда

$$v_s = 15n_{\text{вр}} D_1 \cdot \frac{\pi}{k} \quad (1.8)$$

Конечная скорость зубца в момент удара о поверхность забоя равна нулю. Максимальное изменение скорости перемещения подшипника шарошки, вызванное перекатыванием с зубца на зубец равно половине окружной скорости зубца  $v_s$ . Поэтому величина  $\Delta v$  в выражениях (1.4) и (1.5)  $\Delta v = v_s / 2$ .

Скорость по уравнениям (1.4) и (1.5) при оценке ударных нагрузок от

перекатывания зубцов по забою

$$v = v_{\bar{o}} + v_s / 2 ,$$

где  $v_{\bar{o}}$  – скорость бурения при имеющихся свойствах горной породы усилием подачи и скоростью вращения бурового органа [12].

$$v_{\bar{o}} = \frac{40P_{oc} \cdot n_{вр}}{П_{\bar{o}} \cdot D_1^2} , \text{ м/ч.} \quad (1.9)$$

Тогда напряжение в роликах опор качения с учетом ударных нагрузок, возникающих при перекатывании зубцов шарошки по забою

$$\sigma_{р.уд}^{max} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \cdot \frac{2(v_{\bar{o}} + v_s/2)}{2(v_{\bar{o}} + v_s/2) - v_s/2} . \quad (1.10)$$

Напряжение в шарике подшипника качения шарошки, возникающее при ударе,

Для определения ресурса справедливо выражение (1.7).

При этом нагрузка характеризуется напряжением  $\sigma_n = \sigma_{р.уд}^{max}$  или  $\sigma_n = \sigma_{ш.}^{max}$

3. Циклическая нагрузка, характеризующаяся изменением физико-механических свойств горной породы, имеет схожий механизм. Возникающее при этом напряжение связано с переходом кинетической энергии бурового органа в энергию удара при увеличении показателя буримости горной породы. Различие заключается в источнике и механизме образования ударов.

Напряжение в опорах качения, возникающее при изменении свойств породы, выражается через показатель буримости для роликовых (1.6) и шариковых (1.7) тел качения.

Для определения ресурса также справедливо выражение (2.9). При этом

$$\sigma_n = \sigma_{р.уд}^{max} \text{ или } \sigma_n = \sigma_{ш.}^{max}$$

При наложении двух или нескольких циклических процессов периодически возникают моменты, когда максимальные нагрузки складываются. Поэтому оценивать циклическую прочность следует именно по максимальным суммарным циклическим нагрузкам.

Напряжение в роликах опор качения с учетом ударных нагрузок, возникающих при перекачивании зубцов шарошки по забою, а также при изменении свойств породы,

$$\sigma_{\text{р.уд}}^{\Sigma} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \cdot \frac{2(v_{\text{б}} + v_s/2)}{2(v_{\text{б}} + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2\Pi_{\text{б}}^I + 2\Delta\Pi_{\text{б}}}{2\Pi_{\text{б}}^I + \Delta\Pi_{\text{б}}} \quad (1.11)$$

При работе долота также важную роль играет форма зубца шарошки. Внедрение зубца шарошки способствует снижению величины ударных нагрузок. Форма зубца влияет на его проникающую способность в породу. Однако математически представить зависимость проникающей способности зубца шарошки в породу от его формы сложно. В работе [14] представлено численное моделирование процесса смятия инденторов различной формы. В частности, получены относительные значения упруго-пластической деформации  $\delta$  ( $\delta = 1$  было присвоено индентору в форме заостренного цилиндра). Поскольку получены относительные значения, то их можно интерпретировать в качестве коэффициента способности внедрения индентора той или иной формы в породу. Такой величиной будет

$$k_{\text{инд}} = 1 - \delta.$$

Так, для индентора, имеющего форму закругленного цилиндра,  $k_{\text{инд}} = 0,79$ . С учетом формы индентора выражения будут выглядеть следующим образом.

Напряжение в ролике опор качения

$$\sigma_{\text{р.уд}}^{\Sigma} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \cdot \frac{2(v_{\text{б}} + v_s/2)}{2(v_{\text{б}} + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2\Pi_{\text{б}}^I + 2\Delta\Pi_{\text{б}}}{2\Pi_{\text{б}}^I + \Delta\Pi_{\text{б}}} \cdot k_{\text{инд}}; \quad (1.12)$$



где  $k_{инд}$  – коэффициент формы индентора ( $k_{инд} = 0,79$  для индентора, имеющего форму закругленного цилиндра;  $k_{инд} = 0,47$  для индентора, имеющего форму правильного конуса;  $k_{инд} = 0,7$  для индентора, имеющего форму выпуклого конуса).

С учетом представленных уравнений определения ресурса опор качения шарошек можно определить расчетную стойкость буровых долот с коническими шарошками:

$$T = \frac{L}{2 \cdot n_{вр} \cdot \frac{D_1}{D_{ш}^{max}}} \cdot v_б, \text{ М}, \quad (1.13)$$

где  $D_{ш}^{max}$  – максимальный диаметр шарошки.

Для трехшарошечных долот

$$T = \frac{L}{2 \cdot n_{вр} \cdot 1,7} \cdot v_б, \text{ М}. \quad (1.14)$$

За один цикл следует считать нагружение тела качения подшипника шарошки, вызывающее напряжение не ниже минимального, учтенного в расчете. За один оборот подшипника качения, каждое тело качения нагружается 2 раза. Более наглядной характеристикой является стойкость буровых долот, которая, как правило, определяется из опытных данных. Таким образом, при пересчете на стойкость буровых долот диаметром 244,5 мм получим теоретические расчетные результаты.

На рисунке 1.25 представлены расчетные зависимости стойкости буровых долот от осевого усилия, прикладываемого к буровому ставу.

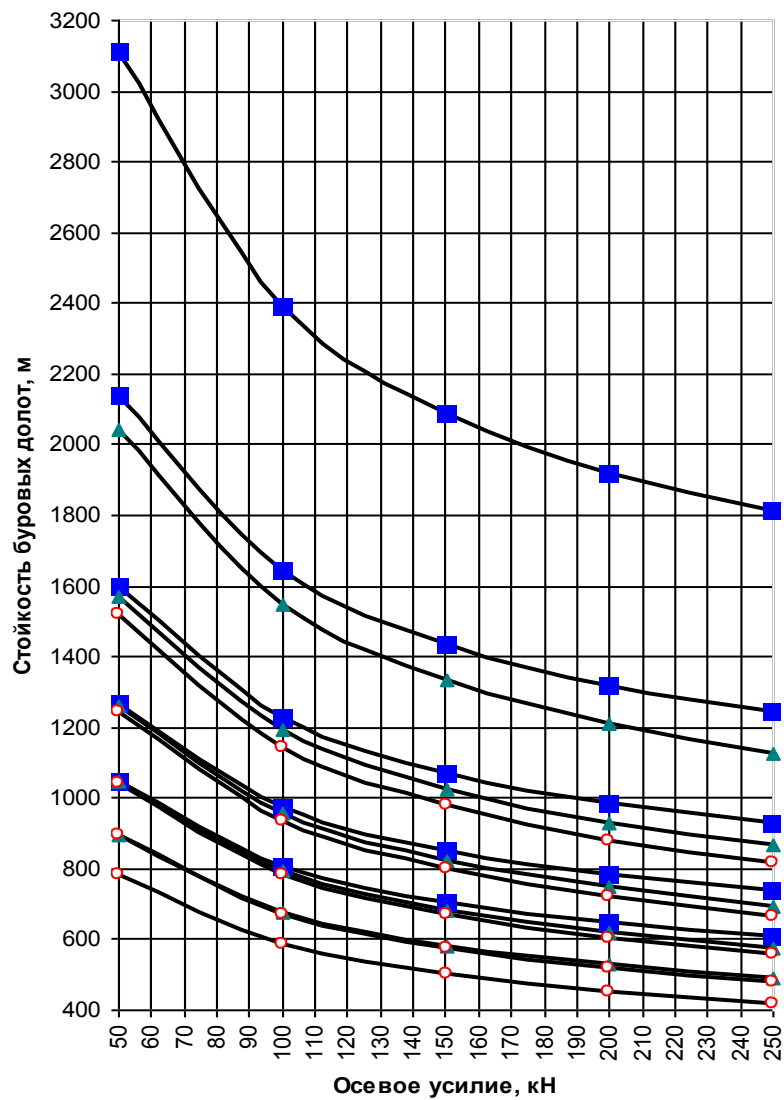


Рисунок 1.25 - Стойкость буровых долот в зависимости от осевого усилия, прикладываемого к буровому стволу при показателе буримости  $P_6$ : ■ – при  $P_6 = 5$ ; ▲ – при  $P_6 = 7,5$ ; ○ – при  $P_6 = 10$  (При каждом значении показателя буримости  $P_6$  принималось колебание показателя буримости  $\Delta P_6$  сверху вниз в размере 0; 1; 2; 3; 4)

При этом можно выделить три вида условий нагружения:

1. Бурение однородной породы без нарушений целостности с приблизительно одинаковыми свойствами или изменением показателя буримости в пределах  $\Delta P_6 < 1$ . Бурение таких массивов горной породы сопровождается только циклической нагрузкой с максимальными

напряжениями в телах качения, определяемыми с помощью выражений (1.10) с учетом коэффициента формы инденторов шарошек  $k_{инд}$ .

2. Бурение слоистой породы характеризуется значительными ударными нагрузками при прохождении шарошечным долотом границ между слоями породы с различными физико-механическими свойствами. Так по слоистости породы делятся на весьма тонкослоистые, тонкослоистые, среднеслоистые, крупнослоистые и весьма крупнослоистые [11]. При этом толщина слоя изменяется от нескольких сантиметров до метра и более. Чтобы найти количество циклов нагружения при переходе границы между слоями породы с разными физико-механическими свойствами, необходимо учитывать количество слоев породы на один погонный метр. Значение этого показателя варьируется от 0 до 20 и более. Работа шарошечного долота в данных условиях нагружения характеризуется наложением циклических нагрузок от ударов зубцов шарошек о поверхность забоя и ударов при изменении показателя буримости породы. Максимальные напряжения для данных условий нагружения находятся из выражений (1.12).

3. Бурение трещиноватой породы характеризуется значительными ударными нагрузками при прохождении шарошечным долотом трещин или несплошностей в массиве горной породы. По трещиноватости породы делятся на нетрещиноватые, слаботрещиноватые, среднетрещиноватые, сильнотрещиноватые и весьма сильнотрещиноватые [11]. Расстояние между трещинами варьируется в пределах от нескольких сантиметров до 10 метров и более. Таким образом, количество трещин на один погонный метр скважины приблизительно находится в пределах от 0 до 20. Однако в выражении для стойкости долота при бурении слоистых и трещиноватых пород должно учитываться абсолютное значение количества трещин или слоев. В данных условиях нагружения опоры шарошечного долота испытывают суммарную циклическую нагрузку от ударов зубцов шарошек о поверхность забоя и ударов при прохождении трещины. Максимальные напряжения для данных условий

нагружения также находятся из выражений (1.12), однако в отличие от бурения слоистой породы, прохождение трещины сопровождается более значительным ударом. Условно можно принять, что в данный момент показатель буримости снижается до нуля и возрастает до прежнего значения. В то время как прохождение границы между слоями сопровождается скачком показателя буримости  $\Delta\Pi_6 < \Pi_6$ .

Для определения стойкости шарошечного долота, работающего при бурении массива горной породы, характеризующегося всеми тремя условиями нагружения, необходимо определить доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы.

$$\eta_{сл} = \frac{n_{сл} \cdot n_{об}^{сл}}{n_{вр} \cdot \frac{D_1}{D_{ш}^{max}}} \cdot v_б; \quad \eta_{тр} = \frac{n_{тр} \cdot n_{об}^{тр}}{n_{вр} \cdot \frac{D_1}{D_{ш}^{max}}} \cdot v_б; \quad \eta_{од} = 1 - \eta_{сл} - \eta_{тр},$$

где  $\eta_{од}$ ,  $\eta_{сл}$ ,  $\eta_{тр}$  – доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы;  $n_{сл}$  – количество границ между слоями породы с разными физико-механическими свойствами на один погонный метр,  $m^{-1}$ ;  $n_{тр}$  – количество трещин в горной породе на один погонный метр,  $m^{-1}$ ;  $n_{об}^{сл}$  – число оборотов долота, необходимое для проходки границы между слоями породы;  $n_{об}^{тр}$  – число оборотов долота, необходимое для проходки трещины в массиве породы;  $v_б$  – скорость бурения при имеющихся свойствах горной породы, усилием подачи и скоростью вращения бурового органа, м/мин;  $n_{вр}$  – частота вращения шарошечного долота, об/мин;  $D_1$  – диаметр шарошечного долота, м;  $D_{ш}^{max}$  – максимальный диаметр шарошки, м.

Число оборотов долота, необходимое для проходки границы между слоями или трещины в массиве породы определяется из следующих выражений.

$$n_{об}^{сл} = \delta_{сл} \cdot \frac{n_{еп}}{v_{б}}; \quad n_{об}^{мп} = \delta_{мп} \cdot \frac{n_{еп}}{v_{б}},$$

где  $\delta_{сл}$  – толщина пограничного слоя или его размер вдоль оси бурового става, м;  
 $\delta_{тр}$  – толщина трещины или ее размер вдоль оси бурового става, м.

Тогда доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы:

$$\eta_{сл} = \frac{n_{сл} \cdot \delta_{сл}}{D_1}; \quad \eta_{мп} = \frac{n_{мп} \cdot n_{об}^{мп}}{n_{еп} \cdot \frac{D_1}{D_{и}^{max}}} \cdot v_{б}; \quad \eta_{од} = 1 - \eta_{сл} - \eta_{мп},$$

Таким образом, суммарное количество циклов до разрушения тел качения при различных условиях нагружения найдем из выражения

$$L_{\Sigma} = L_{од} \cdot \eta_{од} + L_{сл} \cdot \eta_{сл} + L_{мп} \cdot \eta_{мп}.$$

Здесь  $L_{од}$  – количество циклов до разрушения тел качения при бурении однородной породы;  $L_{сл}$  – количество циклов до разрушения тел качения при таких условиях бурения, когда каждый цикл нагружения будет характеризоваться нагрузками, соответствующими преодолению границ между слоями породы с различными физико-механическими свойствами;  $L_{тр}$  – количество циклов до разрушения тел качения при таких условиях бурения, когда каждый цикл нагружения будет характеризоваться нагрузками, соответствующими преодолению трещин или несплошностей в массиве горной породы.

Для условий бурения однородной породы выражение (1.12) для ресурса роликовых опор качения примет вид:

$$L_{од} = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{р.уд.}^{max}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{р.уд.}^{max} - \sigma_p^{max}}{2} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\epsilon}} \cdot \frac{\sigma_{р.уд.}^{max} + \sigma_p^{max}}{2}}.$$

Для условий бурения слоистой породы выражение (1.12) примет вид:

$$L_{cl} = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_{p.уд.}^{\Sigma}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{p.уд.}^{\Sigma} - \sigma_p^{\max}}{2} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\sigma}} \cdot \frac{\sigma_{p.уд.}^{\Sigma} + \sigma_p^{\max}}{2}}.$$

Для условий бурения слоистой породы, поскольку минимальное напряжение цикла  $\sigma_{\min} = 0$ , выражение (1.12) примет вид:

$$L_{cl} = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_{p.уд.}^{\Sigma}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{p.уд.}^{\Sigma}}{2} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\sigma}} \cdot \frac{\sigma_{p.уд.}^{\Sigma}}{2}}.$$

С учетом представленных уравнений определения ресурса опор качения шарошек, можно определить расчетную стойкость буровых долот с коническими шарошками.

$$T = \frac{L_{\Sigma}}{2 \cdot n_{\sigma p} \cdot \frac{D_1}{D_{ш}^{\max}}} \cdot v_{\sigma}, \text{ М},$$

где  $D_{ш}^{\max}$  – максимальный диаметр шарошки.

Для трехшарошечных долот:

$$T = \frac{L_{\Sigma}}{2 \cdot n_{\sigma p} \cdot 1,7} \cdot v_{\sigma}, \text{ М}.$$

С использованием разработанной методики построено несколько зависимостей для пород, значительно отличающихся по трещиноватости и слоистости (рисунок 1.26).

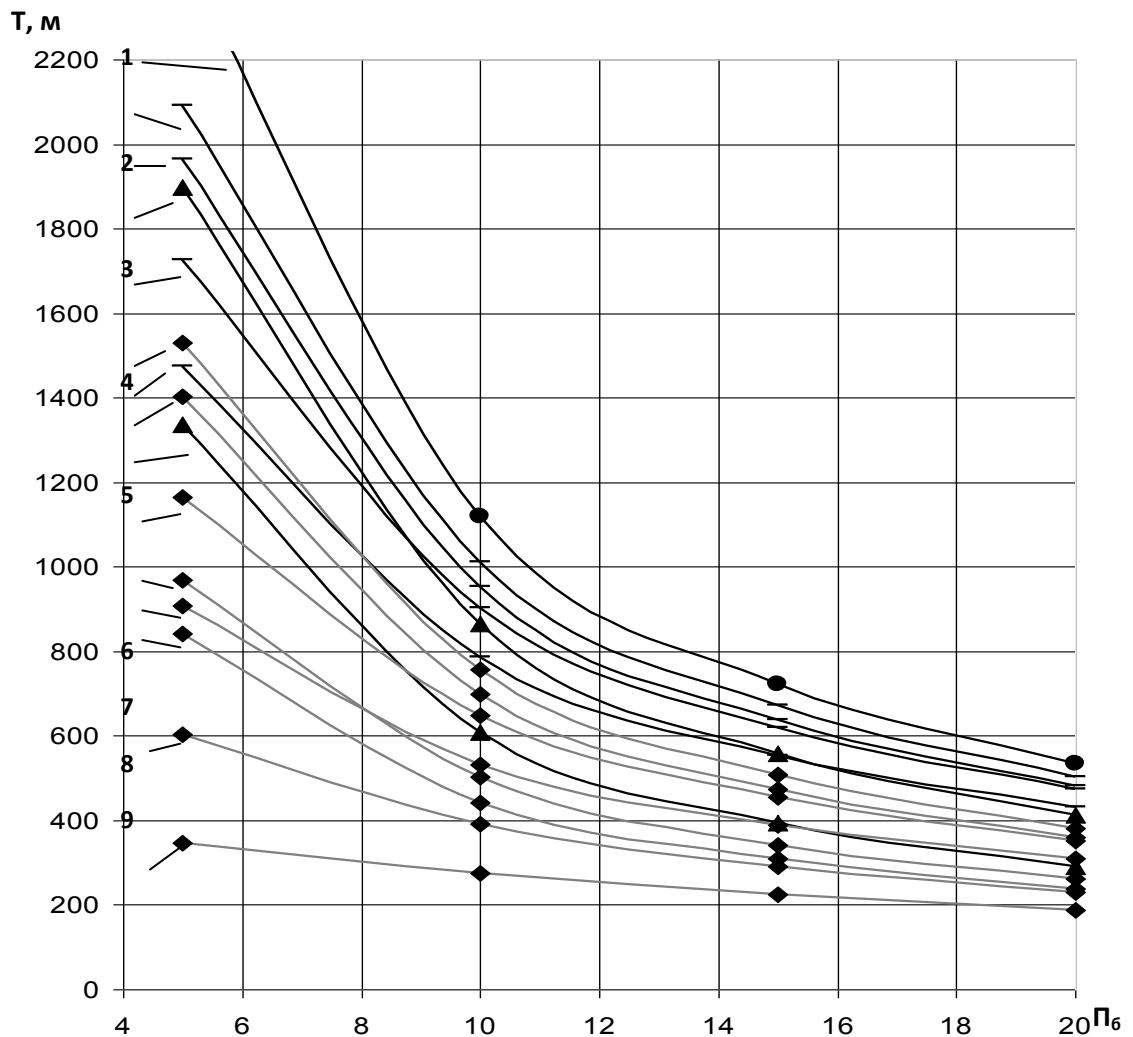


Рисунок 1.26 - Стойкость шарошечных долот диаметром 244,5 мм в зависимости от показателя буримости  $\Pi_b$  для однородных, слоистых, трещиноватых и слоисто-трещиноватых пород

Здесь маркером ● обозначена зависимость для однородной породы (кривая 1). Маркером — обозначены зависимости для слоистых пород. Кривая 2 получена для следующих характеристик породы: количество слоев породы на один погонный метр скважины  $n_{сл} = 10 \text{ м}^{-1}$ ; средняя разница показателя буримости смежных слоев в массиве горной породы  $\Delta\Pi_b = 2$ . Кривая 3 получена при  $n_{сл} = 10 \text{ м}^{-1}$ ,  $\Delta\Pi_b = 4$ ; кривая 5 – при  $n_{сл} = 20 \text{ м}^{-1}$ ,  $\Delta\Pi_b = 2$ ; кривая 7 – при  $n_{сл} = 20 \text{ м}^{-1}$ ,  $\Delta\Pi_b = 4$ . Маркером ▲ обозначены зависимости для трещиноватых пород. Кривая 4 получена при количестве трещин на один погонный метр скважины  $n_{тр} = 10 \text{ м}^{-1}$ ; Кривая 9 – при  $n_{тр} = 20 \text{ м}^{-1}$ . Маркером ◆

обозначены зависимости для массивов горных пород, которые характеризуются и слоистостью и трещиноватостью. Кривая 6 построена при  $n_{тр} = 10 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_{сл} = 10 \text{ м}^{-1}$  и  $\Delta\Pi_6 = 2$ ; кривая 8 – при  $n_{тр} = 10 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_{сл} = 10 \text{ м}^{-1}$  и  $\Delta\Pi_6 = 4$ ; кривая 10 – при  $n_{тр} = 10 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_{сл} = 20 \text{ м}^{-1}$  и  $\Delta\Pi_6 = 2$ ; кривая 11 – при  $n_{тр} = 20 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_{сл} = 10 \text{ м}^{-1}$  и  $\Delta\Pi_6 = 2$ ; кривая 12 – при  $n_{тр} = 10 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_{сл} = 20 \text{ м}^{-1}$  и  $\Delta\Pi_6 = 4$ ; кривая 13 – при  $n_{тр} = 20 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_{сл} = 10 \text{ м}^{-1}$  и  $\Delta\Pi_6 = 4$ ; кривая 14 – при  $n_{тр} = 20 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_{сл} = 20 \text{ м}^{-1}$  и  $\Delta\Pi_6 = 2$ ; кривая 15 – при  $n_{тр} = 20 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_{сл} = 20 \text{ м}^{-1}$  и  $\Delta\Pi_6 = 4$ .

Разработанная методика определения стойкости шарошечных долот требует учета усилия подачи, частоты вращения бурового става, механических свойств стали тел качения в опорах шарошек, а также размера трещины и пограничных слоев вдоль оси бурового става. Для примера зависимости на рис. 2 получены при усилении подачи 200 кН, частоте вращения 1,5 об/с, размере трещины и пограничных слоев вдоль оси бурового става 10 мм.

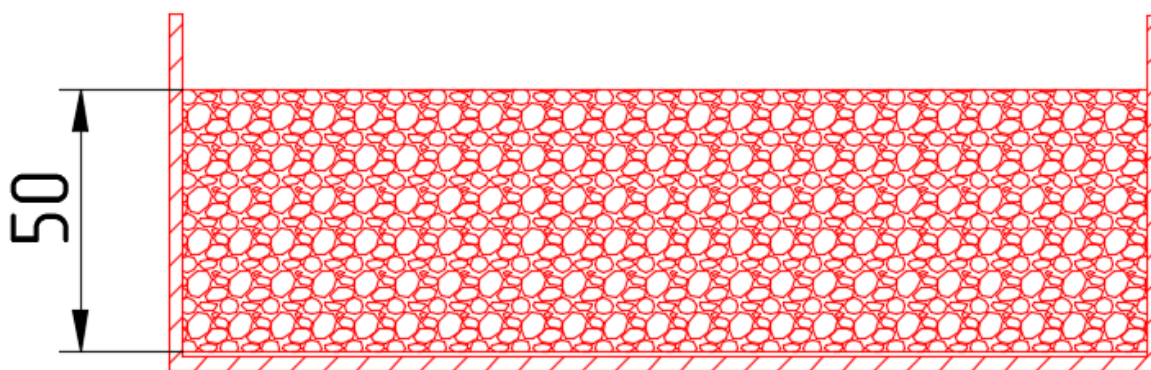
Методика является достаточно простой в использовании и предназначена для определения прогнозной стойкости шарошечных долот разных типов и размеров при их работе в условиях бурения пород, характеризующихся различной степенью слоистости и трещиноватости. При этом многопараметрический расчет целесообразно производить при помощи специального программного обеспечения. Данное программное обеспечение может показывать остаточный прогнозный ресурс шарошечного долота при том или ином режиме работы бурового станка. При этом машинист должен иметь возможность видеть в постоянном режиме насколько эффективно работает машина, отслеживая также соотношение усилия подачи, частоты вращения, скорости бурения и остаточного прогнозного ресурса.



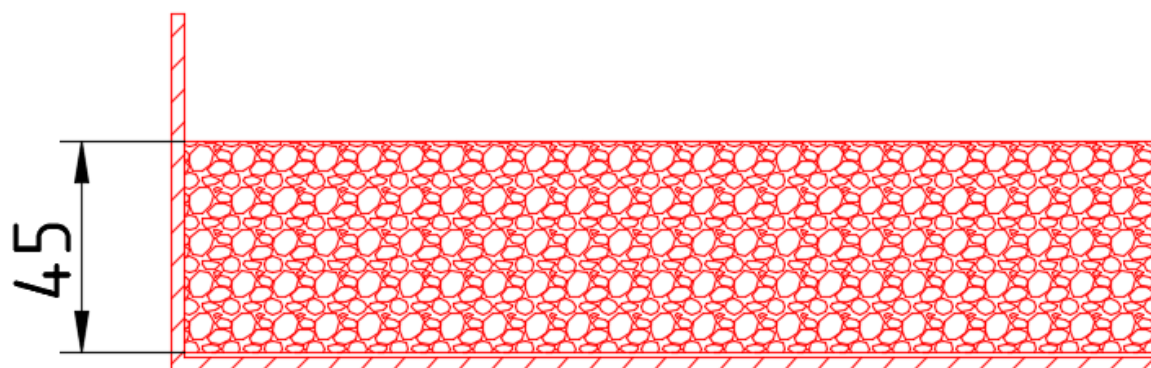
## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ

### 2.1 Экспериментальные исследования

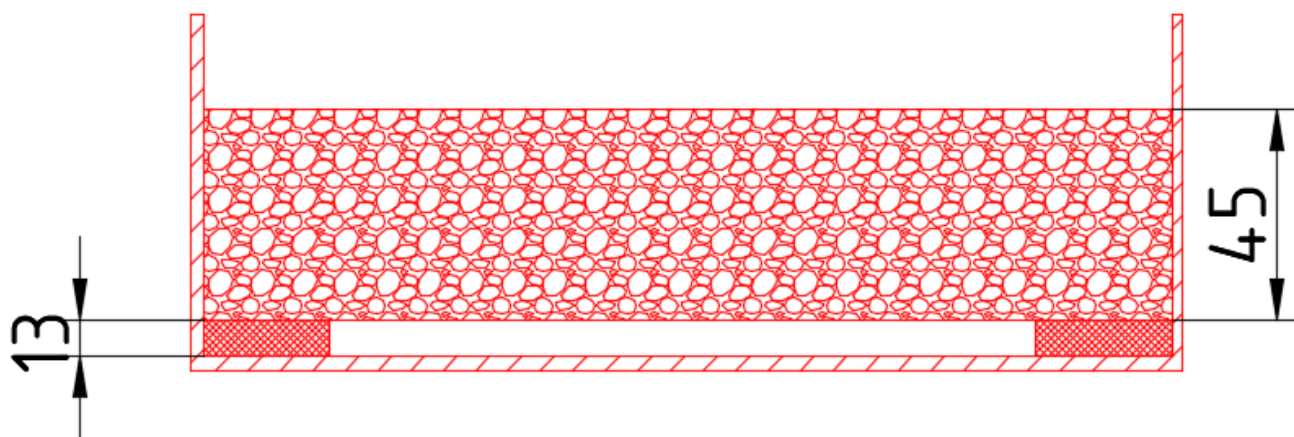
Для исследования прочностных и энергетических характеристик горных пород планируется выполнить разрушение образцов пород в лабораторных условиях на специальном стенде. Образцы породы состоят из наборных слоев с имеющимися дефектами в виде трещин. Схемы образцов с трещинами представлены на рисунке 2.1. В качестве материала для образцов используется газобетон марки D500, прочностью 5 МПа ( $f=0,05$ ).



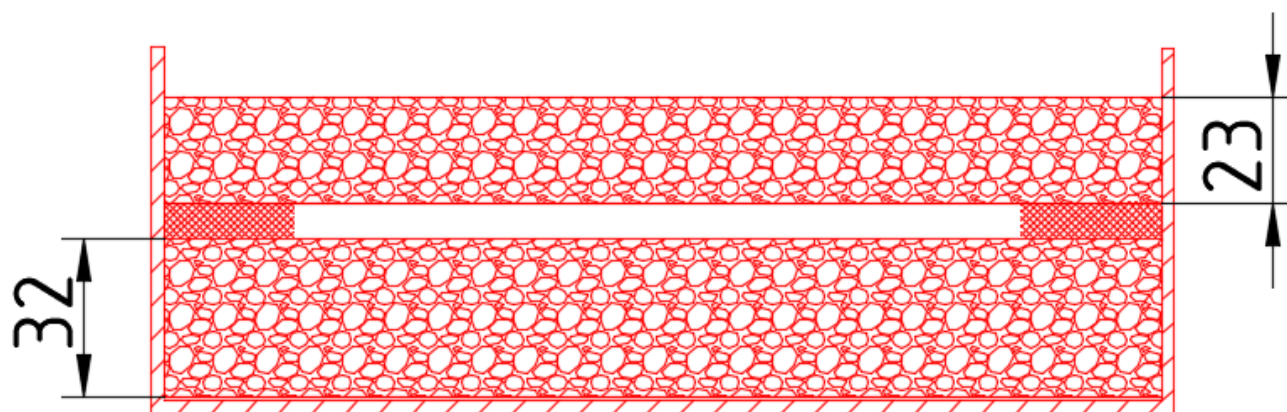
а



б



В



Г

Рисунок 2.1 - Образцы породы: а - порода толщиной 50 мм; б - порода толщиной 45 мм; в - порода толщиной 45мм с трещиной 13мм; г - порода толщиной 23мм и 32мм с трещиной 13мм

Таблица 2.1 – Характеристика разрушения образца породы толщиной 45 мм (рисунок 1б). Испытания индентором закруглённой формы

№	Вес (кг)	Высота(мм)	Динамический вес(кг)	Динамический коэф.	Разрушение	mgh	Энерг. Разр. с учетом подобия
1	0,63	300	2	3,2	-	1,852	370,4
2	0,87	300	6	6,9	-	2,557	511,4
3	1,1	300	8	7,3	-	3,32	664
4	1,88	300	13	6,9	-	5,52	1104

5	2,08	300	11	5,3	-	6,115	1223
6	2,32	300	14	6	-	6,82	1364
7	2,56	300	15,5	6,1	-	7,526	1505,2
8	0,63	400	5	7,9	-	2,469	493,8
9	0,87	400	7	8	-	3,41	682
10	1,1	400	9	8,2	-	4,429	885,8
11	1,88	400	14,5	7,7	-	7,37	1474
12	2,08	400	16	7,7	+	8,153	1630,6
13	2,32	400	17	7,3	+	9,094	1818,8
14	2,56	400	17	6,6	+	10,03	2006

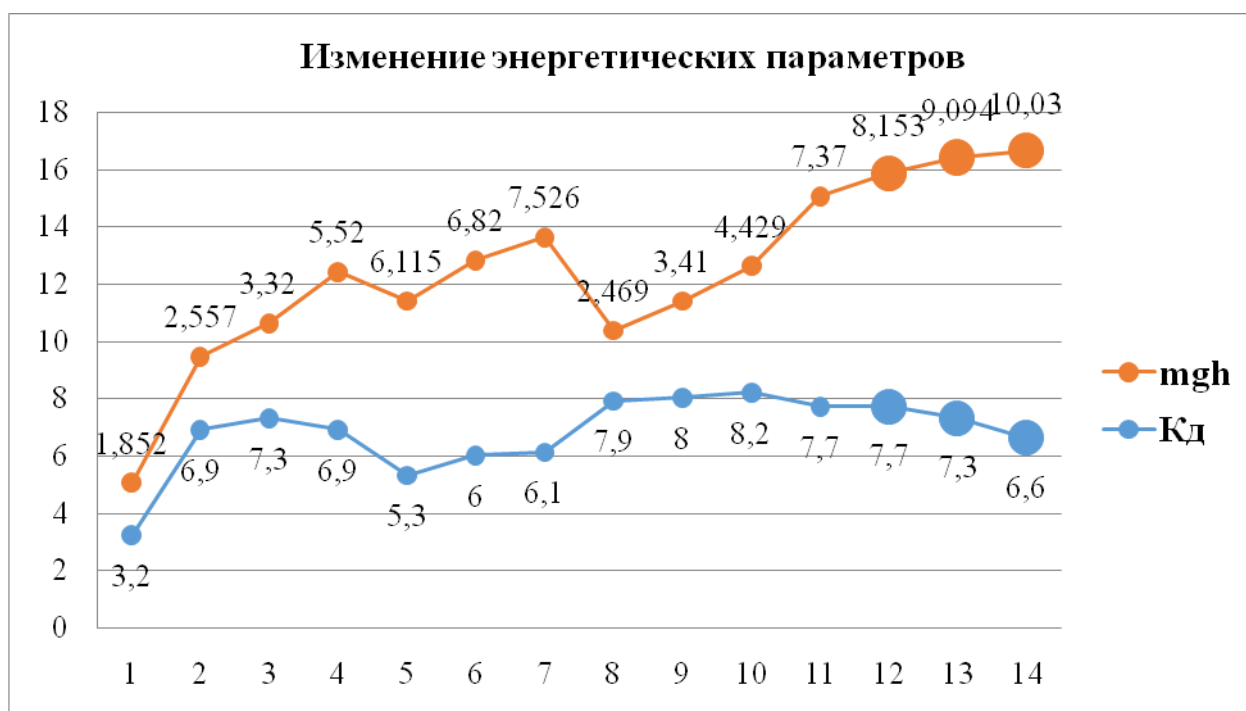


Рисунок 2.2 - Изменение энергетических параметров: график изменения энергии удара индентора закругленной формы на породу (mgh); график изменения динамического коэффициента ( $K_d$ )

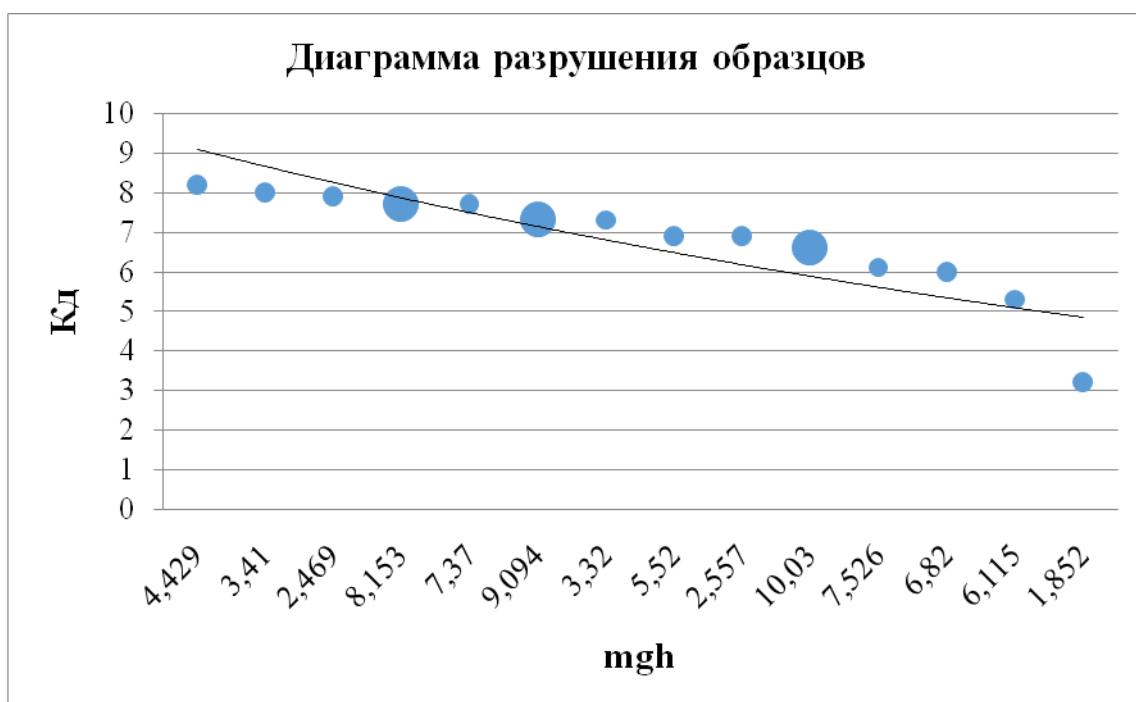


Рисунок 2.3 - Диаграмма разрушения образцов породы толщиной 45 мм  
индентором закругленной формы

Таблица 2.2 – Характеристика разрушения образца породы толщиной 30мм  
Испытания индентором закругленной формы

№	Вес(кг)	Высота(мм)	Динамический вес(кг)	Динамический коэф.	Разрушение	mgh	Энерг. Разр. с учетом подобия
1	0,63	200	3	4,8	-	1,23	246
2	1,1	200	6,5	6	-	2,156	431,2
3	2,08	200	7	3,4	-	4,07	814
4	2,56	200	13	5,1	-	5,01	1002
5	4,1	200	18,5	4,5	+	8,03	1606
6	3,33	200	15	4,5	-	6,47	1294
7	3,57	200	16,9	4,7	-	7	1400
8	3,81	200	17	4,5	-	7,5	1500
9	4	200	18,9	4,7	+	7,84	1568

10	0,63	300	4,5	7,1	+	1,852	370,4
11	0,87	300	6,5	7,5	+	2,557	511,4
12	1,1	300	8	7,3	+	3,32	664
13	0,63	400	6	9,5	+	2,469	493,8
14	0,87	400	8	9,2	+	3,41	682
15	1,1	400	10	9,1	+	4,429	885,8

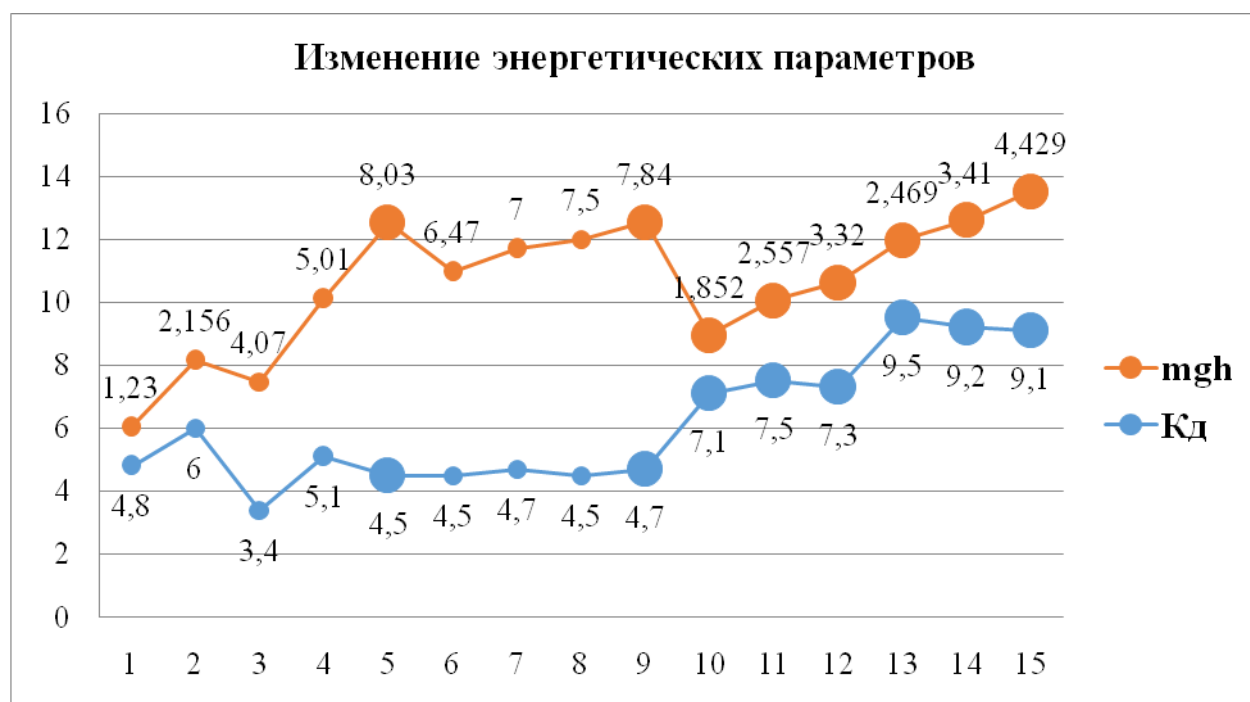


Рисунок 2.4 - Изменение энергетических параметров: график изменения энергии удара индентора закругленной формы на породу (mgh); график изменения динамического коэффициента (K<sub>д</sub>)

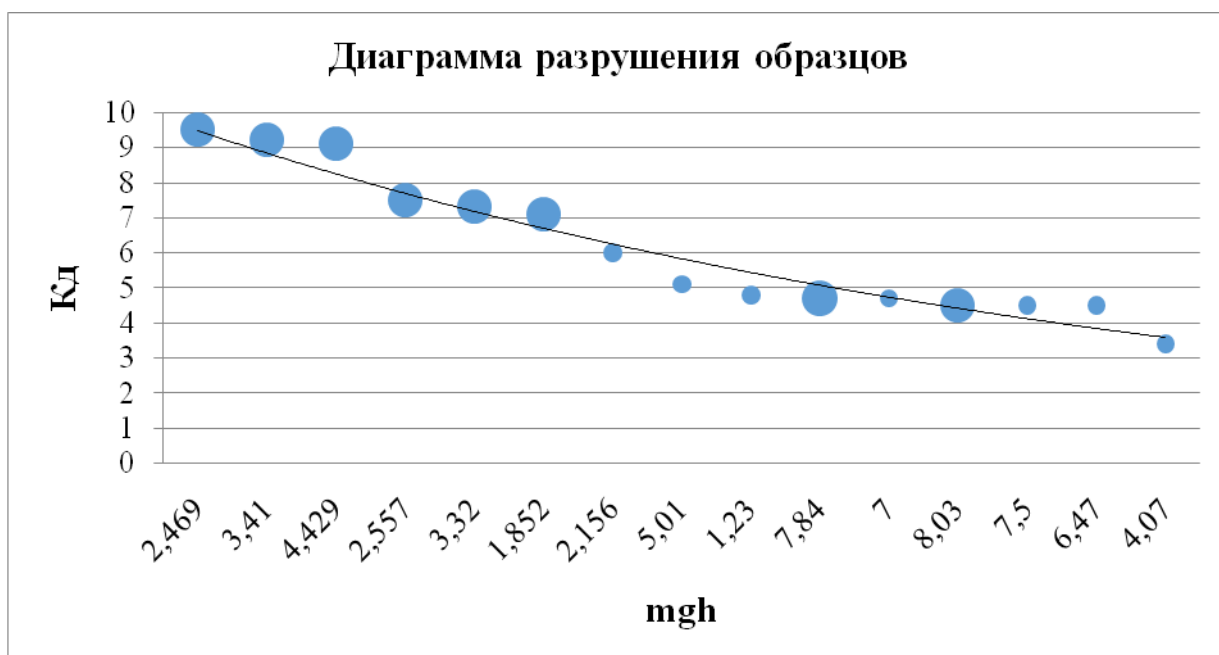


Рисунок 2.5 - Диаграмма разрушения образцов породы толщиной 30 мм  
индентором закругленной формы

Таблица 2.3 – Характеристика разрушения образца породы толщиной 45 мм с  
трещиной 13 мм (рисунок 1в). Испытания индентором закругленной формы

№	Вес(кг)	Высота(мм)	Динамический вес(кг)	Динамический коэф.	Разрушение	mgh	Энерг. Разр. с учетом подобия
1	1,13	100	4,5	4	-	1,107	221,4
2	2,08	100	8	3,8	-	2,03	406
3	2,32	100	9	3,9	-	2,273	454,6
4	2,56	100	10	3,9	-	2,508	501,6
5	2,65	100	12,5	4,7	-	2,597	519,4
6	2,89	100	13,5	4,7	-	2,832	566,4
7	3,5	100	15	4,3	-	3,43	686
8	4,75	100	19	4	-	4,655	931
9	5,24	100	20	3,8	-	5,135	1027
10	0,63	200	4	6,3	-	1,234	246,8

11	0,87	200	3	3,4	+	1,7	340
12	0,63	300	4,5	7,1	-	1,852	370,4
13	0,87	300	6,5	7,5	+	2,557	511,4
14	0,63	400	5,5	8,7	-	2,47	494
15	0,87	400	6	7	+	3,41	682

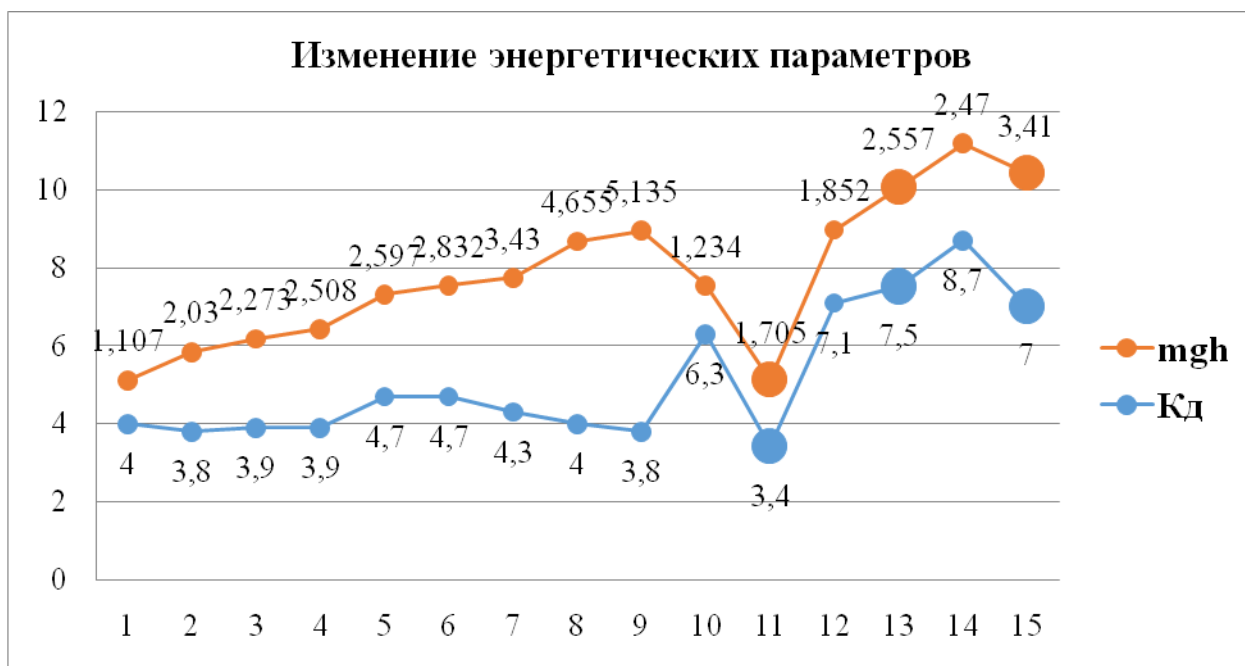


Рисунок 2.6- Изменение энергетических параметров: график изменения энергии удара индентора закругленной формы на породу (mgh); график изменения динамического коэффициента ( $K_d$ )

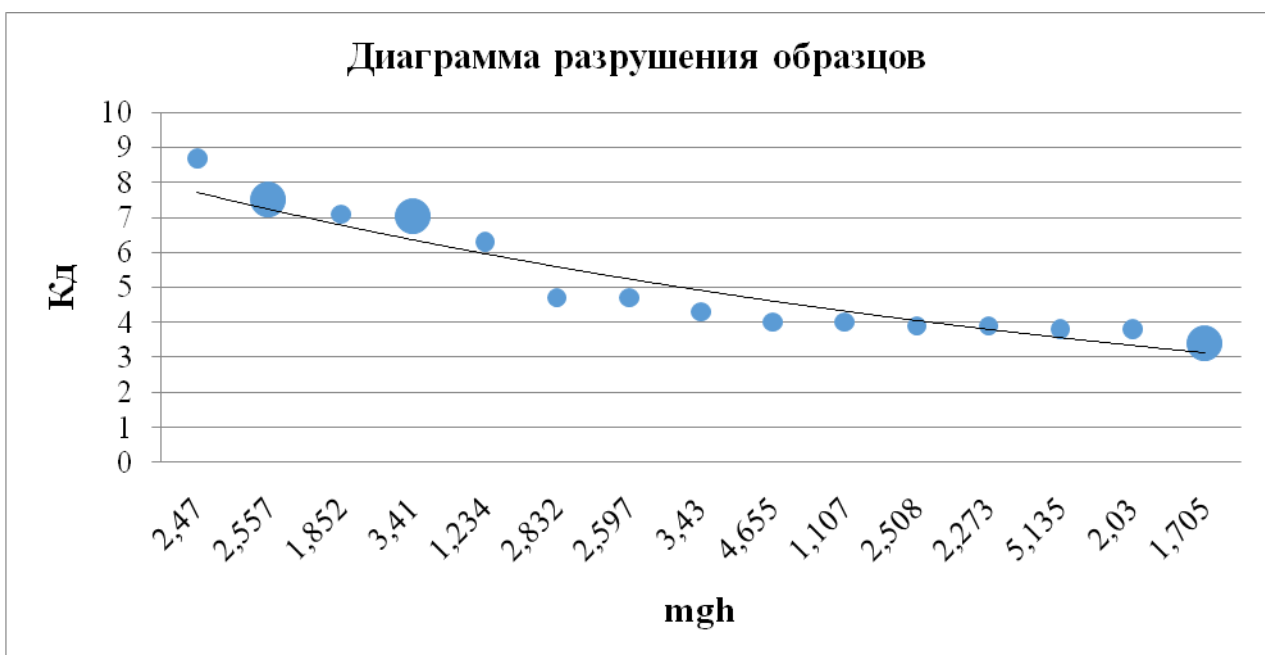


Рисунок 2.7- Диаграмма разрушения образцов породы толщиной 45 мм с трещиной 13 мм индентором закругленной формы

Таблица 2.4 – Характеристика разрушения образцов породы толщиной 23мм и 32мм с трещиной 13 мм (рисунок 1г). Испытания индентором закругленной формы

№	Вес(кг)	Высота(мм)	Динамический вес(кг)	Динамический коэф.	Разрушение	mgh	Энерг. Разр. с учетом подобия
1	0,63	50	1,5	2,4	-	0,3	60
2	0,87	100	2,5	2,9	-	0,8	160
3	0,63	150	3	4,8	Верхний слой	0,92	184
4	0,63	200	4,2	6,7	Верхний слой	1,23	246
5	0,63	300	3,5	5,6	Верхний слой	1,85	370
6	0,87	300	4	4,6	Верхний слой	2,55	510
7	1,1	300	6,5	5,9	Верхний слой	3,32	664
8	2,08	300	13	6,3	Верх.слой и нижний	6,15	1230
9	2,08	400	14	6,7	Верх.слой и	8,153	1630,6



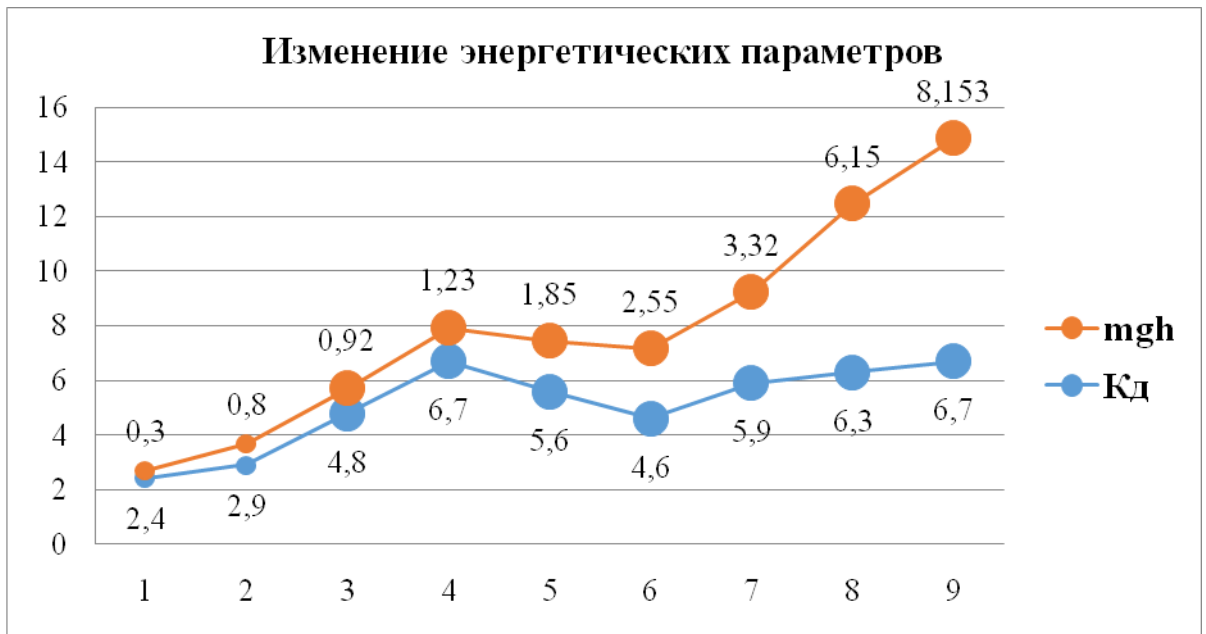


Рисунок 2.8 - Изменение энергетических параметров: график изменения энергии удара индентора закругленной формы на породу (mgh); график изменения динамического коэффициента ( $K_d$ )

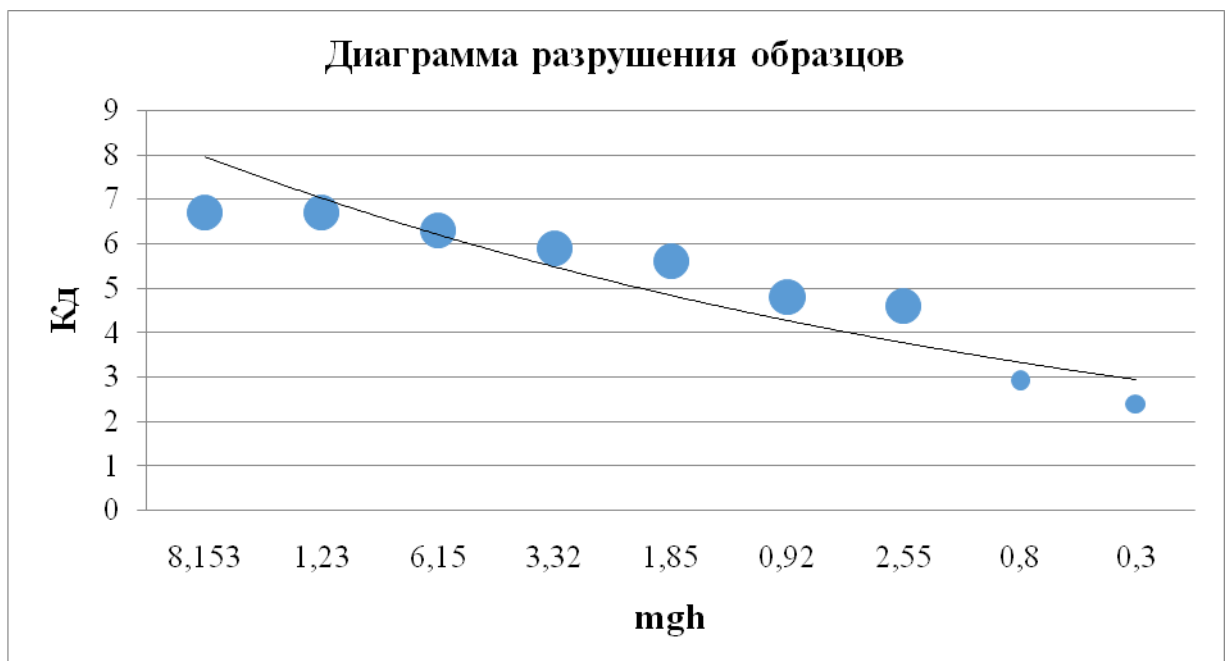


Рисунок 2.9 - Диаграмма разрушения образцов породы толщиной 23 мм и 32 мм с трещиной 13 мм индентором закругленной формы

Таблица 2.5 – Характеристика разрушения образца породы толщиной 45 мм (рисунок 1б). Испытания индентором острой формы

№	Вес(кг)	Высота(мм)	Динамический вес(кг)	Динамический коэф.	Разрушение	mgh	Энерг. Разр. с учетом подобия
1	0,87	200	5	5,7	-	1,7	340
2	1,1	200	6,5	5,9	-	2,15	430
3	1,88	200	9,6	5,1	-	3,68	736
4	2,56	200	11,6	4,5	+	5,01	1002
5	3,33	200	16,3	4,9	+	6,5	1300
6	3,81	200	18	4,7	+	7,5	1500
7	4,1	200	19	4,6	+	8,03	1606
8	1,1	300	8,3	7,5	-	3,23	646
10	1,88	300	11,5	6,1	+	5,52	1104
11	2,08	300	13	6,3	+	6,11	1222
12	2,32	300	15	6,5	+	6,82	1364
13	2,56	300	16	6,3	+	7,52	1504
14	0,87	400	6	6,9	+	3,41	682
15	1,1	400	7	6,4	+	4,31	862
16	1,88	400	13,2	7	+	7,37	1474
17	2,56	400	16	6,3	+	10	2000

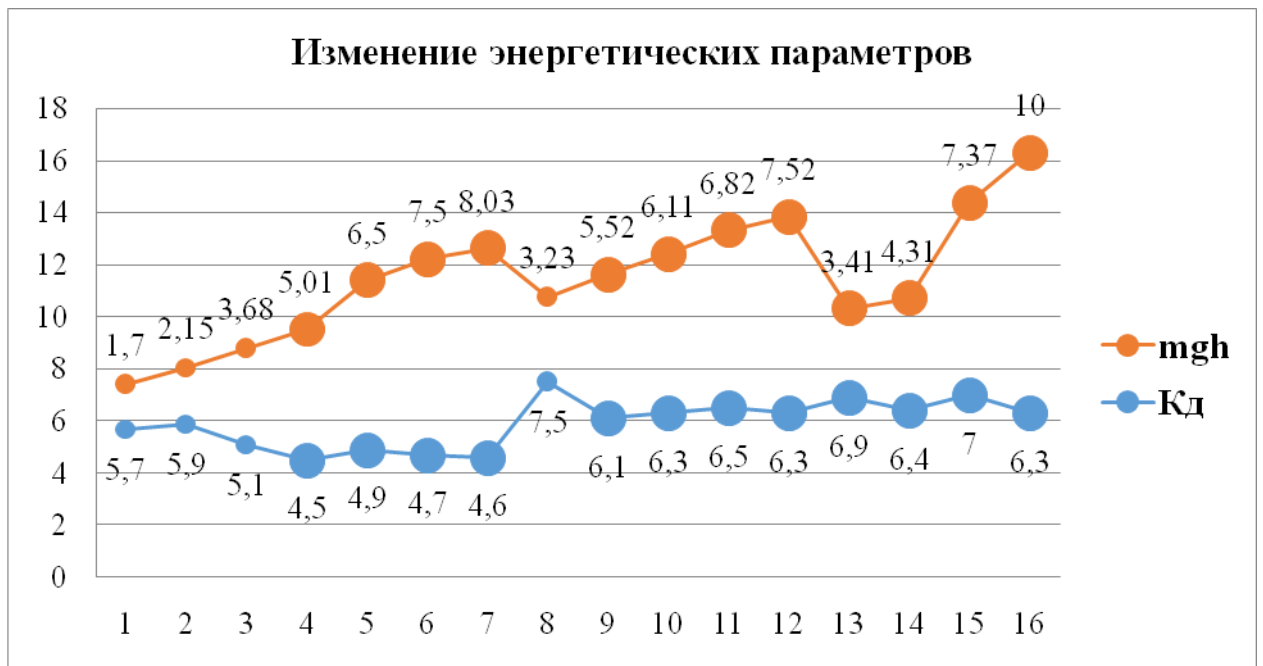


Рисунок 2.10 - Изменение энергетических параметров: график изменения энергии удара индентора закругленной формы на породу (mgh); график изменения динамического коэффициента ( $K_d$ )

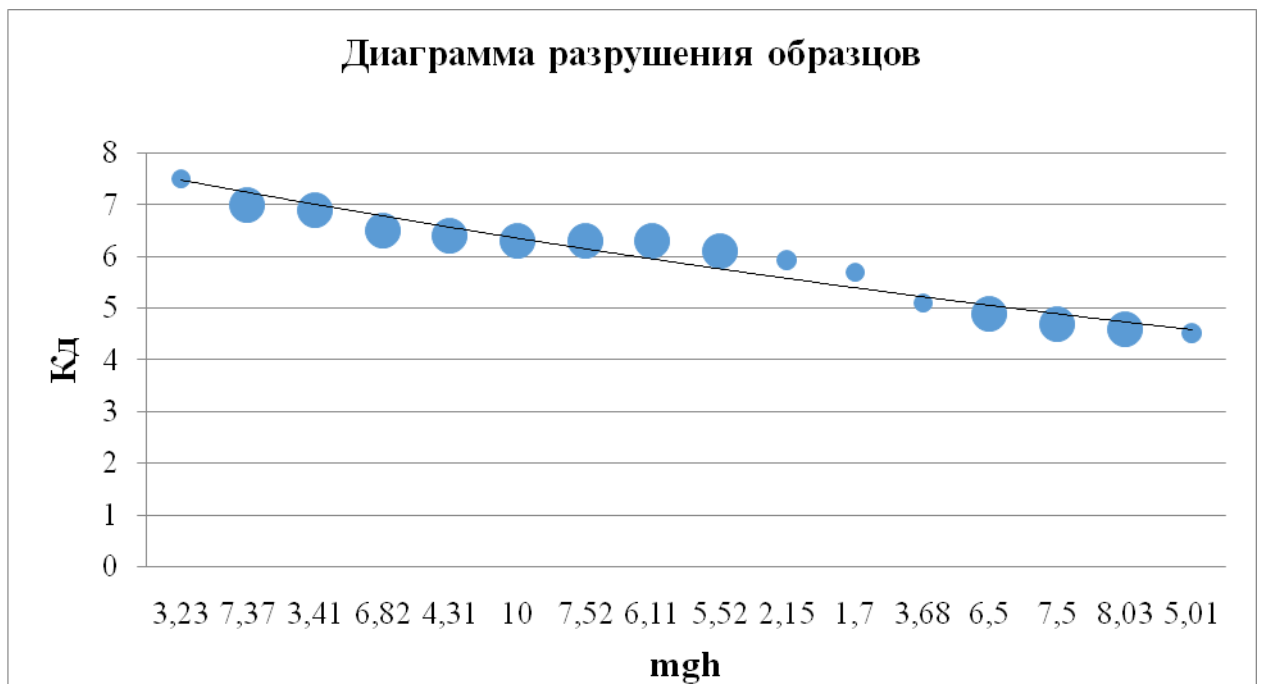


Рисунок 2.11 - Диаграмма разрушения образцов породы толщиной 45 мм индентором острой формы

Таблица 2.6 – Характеристика разрушения образца породы толщиной 45 мм с трещиной 13 мм (рисунок 3в). Испытания индентором острой формы

№	Вес(кг)	Высота(мм)	Динамический вес(кг)	Динамический коэф.	Разрушение	mgh	Энерг. Разр. с учетом подобия
1	0,63	200	4	6,3	-	1,23	246
2	0,87	200	3	3,4	+	1,7	340
3	1,1	200	6	5,5	+	2,15	430
4	0,63	300	4,5	7,1	-	1,85	370
5	0,87	300	5,5	6,3	+	2,55	510
6	1,1	300	5,8	5,3	+	3,23	646
7	0,63	400	6	9,5	-	2,469	493,8
8	0,87	400	6,5	7,5	+	3,4	680

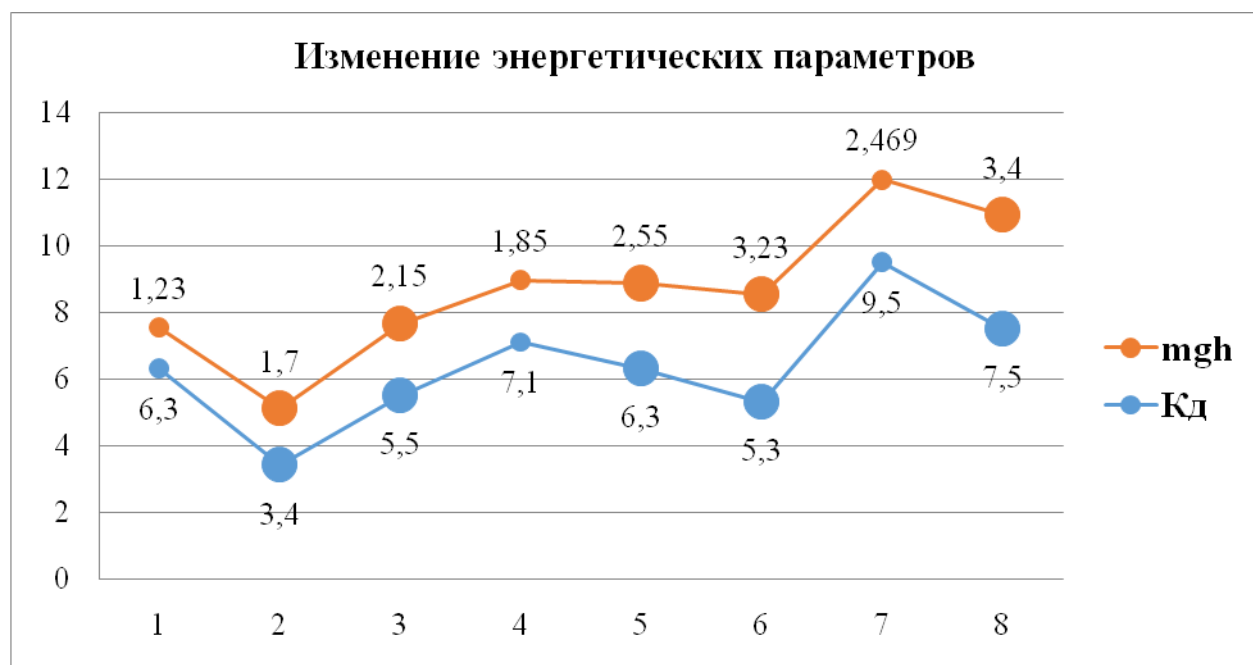


Рисунок 2.12 - Изменение энергетических параметров: график изменения энергии удара индентора закругленной формы на породу (mgh); график изменения динамического коэффициента ( $K_d$ )

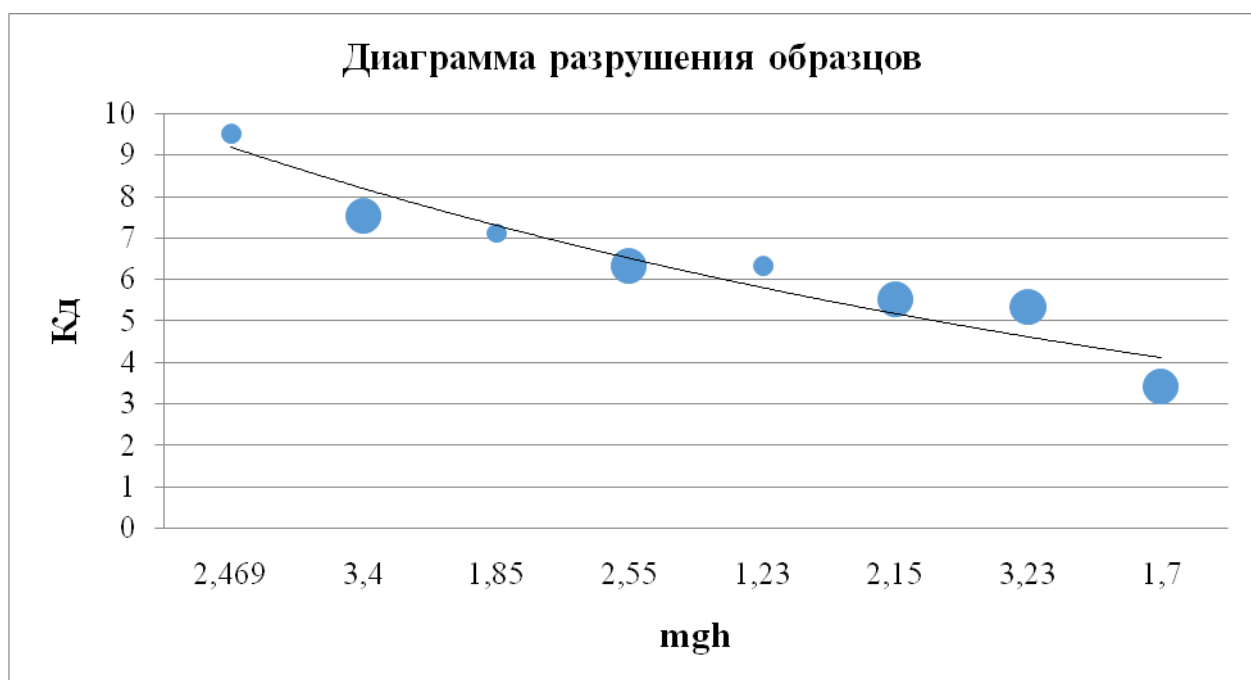


Рисунок 2.13 - Диаграмма разрушения образцов породы толщиной 45 мм с трещиной 13 мм индентором острой формы

Таблица 2.7 – Характеристика разрушения образцов породы толщиной 23 мм и 32 мм с трещиной 13 мм (рисунок 1г). Испытания индентором острой формы

№	Вес(кг)	Высота(мм)	Динамический вес(кг)	Динамический коэф.	Разрушение	mgh	Энерг. Разр. с учетом подобия
1	0,63	50	2	3,2	-	0,3	60
2	0,63	100	2,5	4	-	0,6	120
3	0,63	150	3	4,8	Верх.слой	0,9	180
4	0,63	200	3,3	5,2	Верх.слой	1,23	246
5	0,87	200	4,5	5,2	Верх.слой	1,7	340
6	1,1	200	5,3	4,8	Верх.слой	2,1	420
8	0,63	300	4	6,3	Верх.слой	1,85	370
9	1,1	300	6,5	5,9	Верх.слой	3,23	646
10	1,88	300	9,5	5,1	Верх.слой и нижний	5,52	1104

11	2,08	300	11,2	5,4	Верх.слой и нижний	6,11	1222
12	0,63	400	3,8	6	Верх.слой и нижний	1,85	370
13	1,1	400	12,5	11,4	Верх.слой и нижний	3,23	646

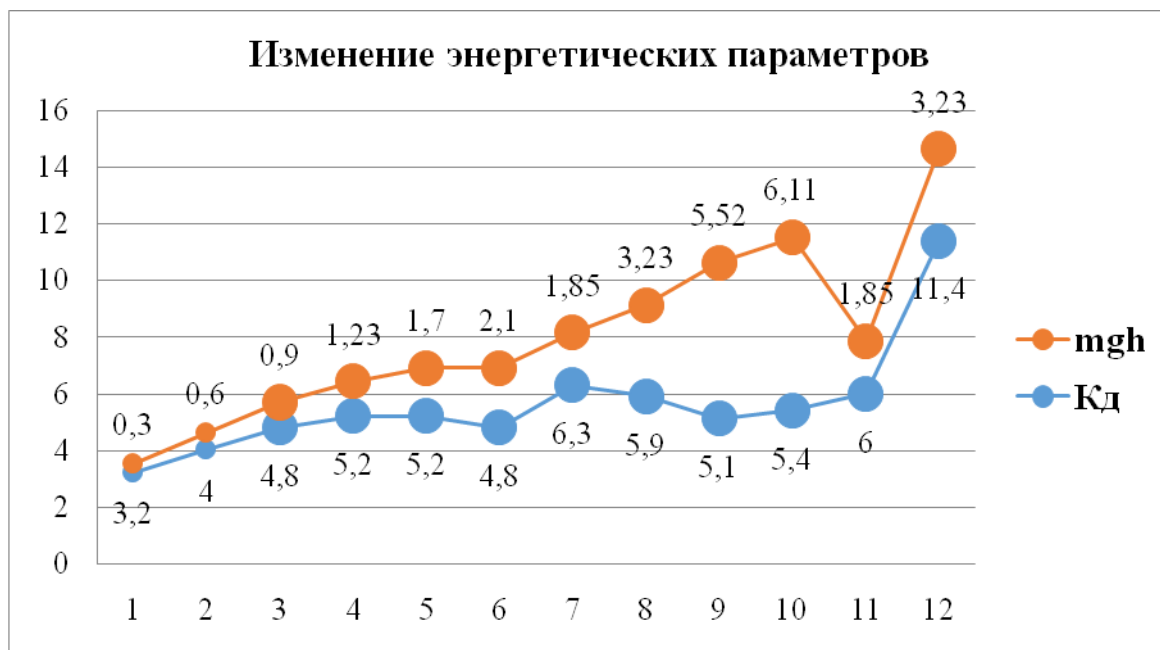


Рисунок 2.14 - Изменение энергетических параметров: график изменения энергии удара индентора закругленной формы на породу (mgh); график изменения динамического коэффициента ( $K_d$ )

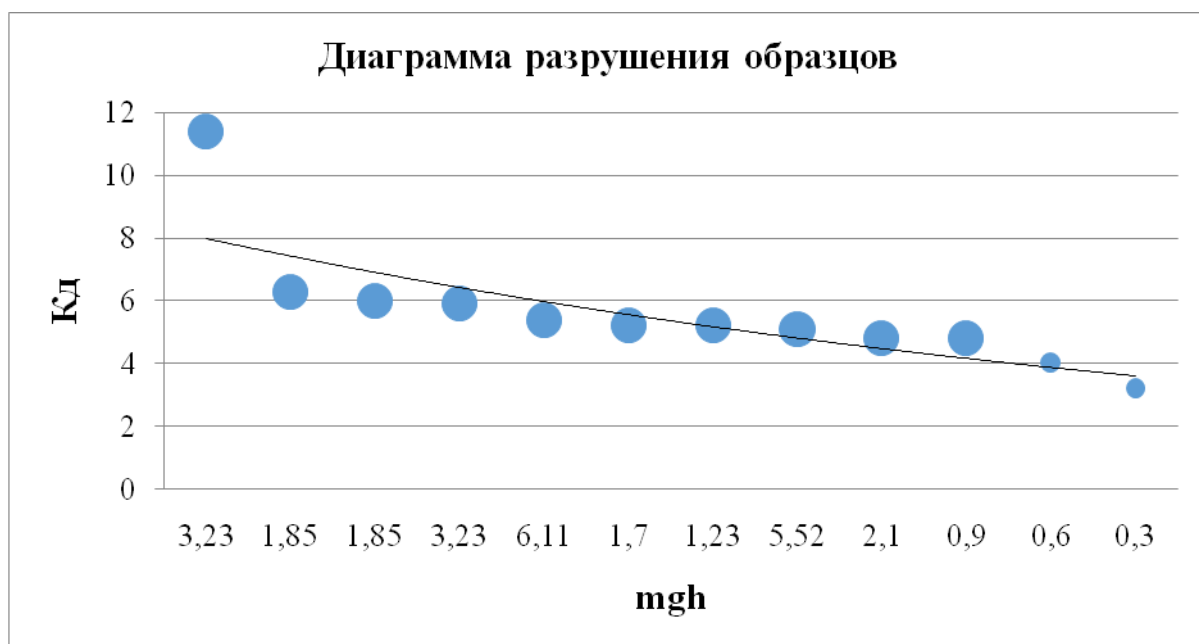


Рисунок 2.15 - Диаграмма разрушения образцов породы толщиной 23 мм и 32 мм с трещиной 13 мм индентором острой формы

Таблица 2.8- Характеристика разрушения образца породы толщиной 50 мм (рисунок 1а). Испытания индентором закругленной формы

№	Вес(кг)	Высота(мм)	Динамический вес(кг)	Динамический коэф.	Разрушение	mgh	Энерг. Разр. с учетом подобия
1	0,63	200	4	6,3	-	1,23	246
2	1,1	200	5	4,5	-	2,16	432
3	1,88	200	9,5	5	-	3,68	736
4	2,08	200	11,8	5,6	-	4,07	814
5	2,32	200	16	6,9	-	4,5	900
6	2,32	300	14,5	6,2	-	6,8	1360
7	2,32	400	17	7,3	-	9	1800
9	2,56	400	17,6	6,8	-	10	2000
10	3,3	400	19	5,7	+	12,93	2586
11	3,57	400	22	6,2	+	14	2798,9

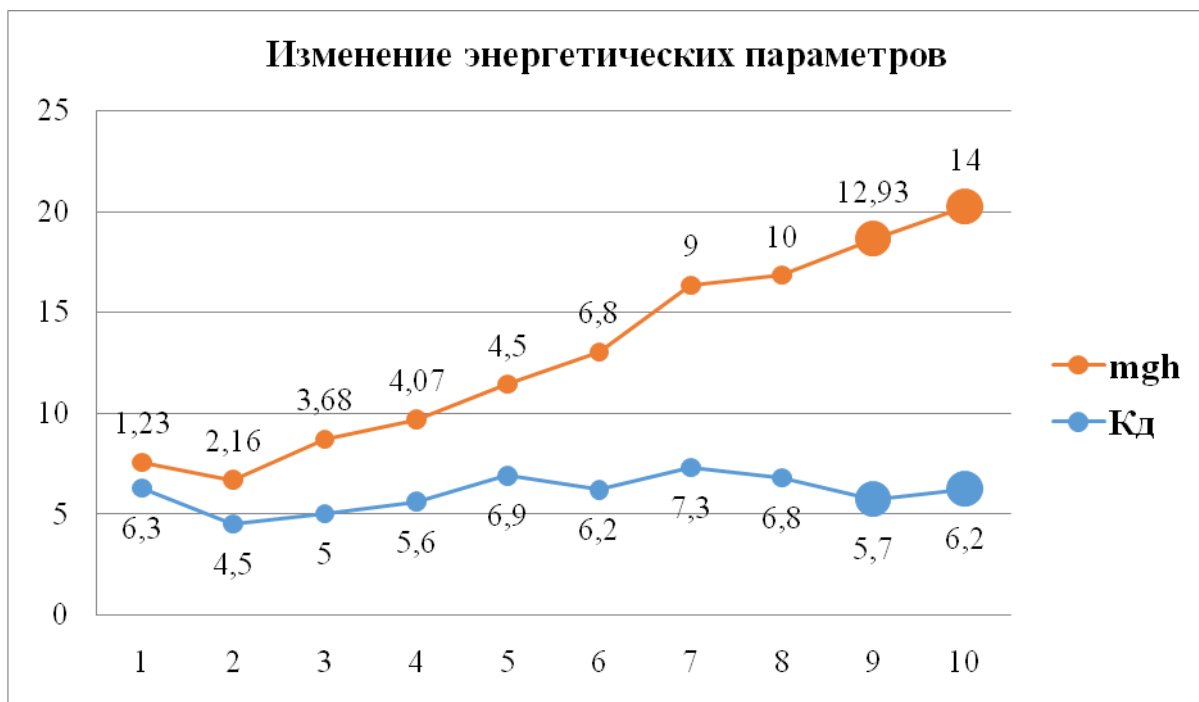


Рисунок 2.16 - Изменение энергетических параметров: график изменения энергии удара индентора закругленной формы на породу (mgh); график изменения динамического коэффициента ( $K_d$ )

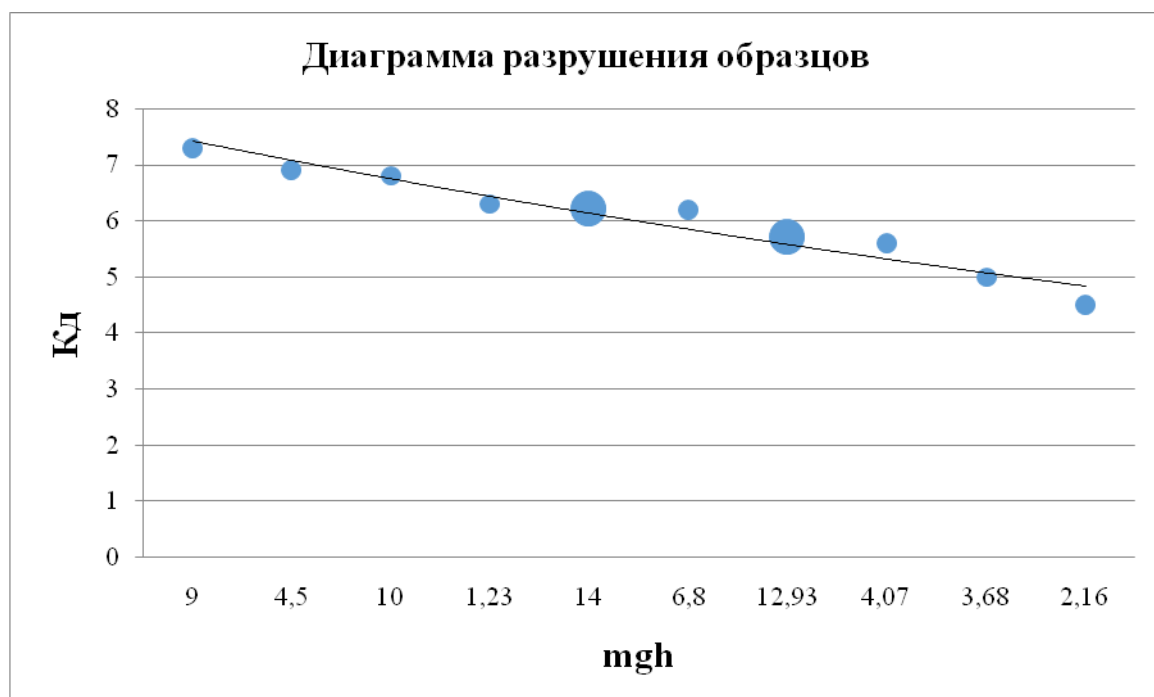


Рисунок 2.17 - Диаграмма разрушения образцов породы толщиной 50 мм индентором закругленной формы



## 2.2 Сопоставление экспериментальных результатов

В лабораторных условиях выполнено исследование разрушения породного массива имеющего в структуре трещины и пустоты. Поскольку рабочие характеристики карьерных буровых станков отличаются от моделируемых силовых нагрузок и прочностные характеристики горных пород отличаются от прочности лабораторных образцов необходимо использовать методы подобия.

Для сопоставления прочностных свойств необходимо использовать коэффициент подобия по крепости

$$K_f = \frac{f}{f_{\text{п.обр}}} = \frac{10}{0,5} = 200 \quad (2.2)$$

В лабораторных условиях смоделирован процесс опускания зубца шарошки на породу (забой) с определенным усилием, как показано на рисунке 2.18.

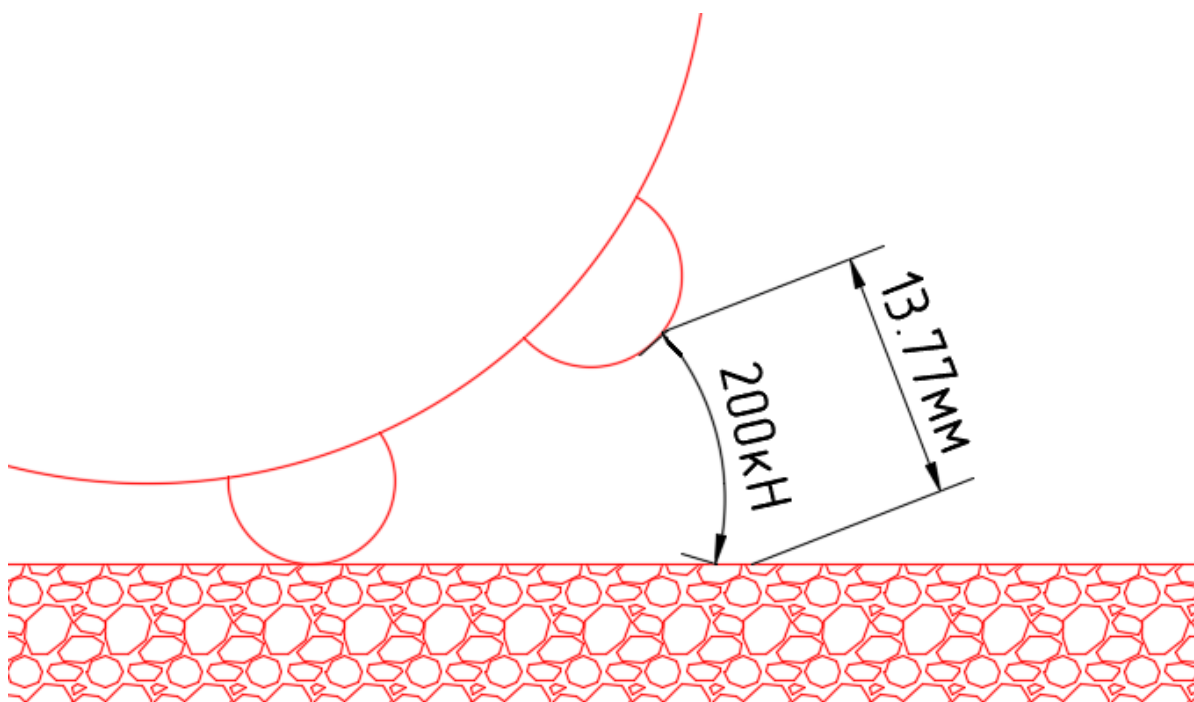


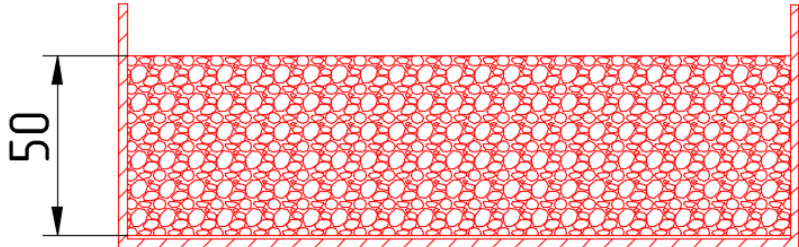
Рисунок 2.18 - Схема опускания зубца шарошечного долота диаметром 244,5 мм на породу.

В результате опускание зубца шарошечного долота выполняется работа по разрушению некоторого объема породы (формула 2.2) . Этой энергии достаточно для разрушения хрупкой породы крепостью от 6 до 12 (и более). Выражение (2.2) показывает, что энергия разрушения породы находится в пределах 2754 Дж.

$$A = P * S = 200000 * 13,77 * 10^{-3} = 2754 \text{ Дж} \quad (2.2)$$

Экспериментальные исследования показали, что разрушение лабораторного образца, не имеющего дефектов, разрушается при достижении энергии 12,93 Дж. С учетом коэффициента подобия по крепости минимальная энергия разрушения горной породы равна 2586 Дж. Таким образом, проведенные исследования показывают высокую сходимость результатов лабораторных исследований и расчетных данных. На основании исследований, получены следующие характеристики разрушения горных пород крепостью  $f=10$ , имеющих в структуре массива трещины различных размеров.

Таблица 2.9 - Обобщенные результаты экспериментальных исследований прочностных и энергетических характеристик горных пород при их разрушении индентором закругленной формы

Схема	Энергия разрушения, Дж	Доля энергии от разрушения образца без дефекта
	2586	1,0

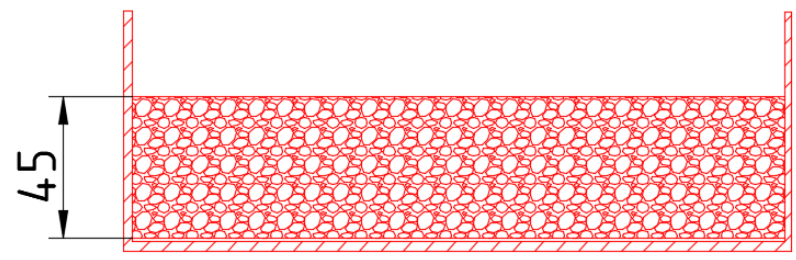
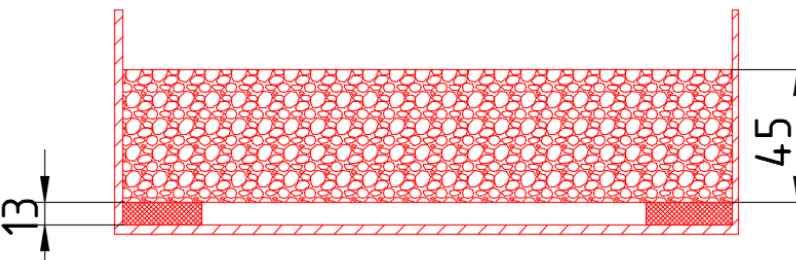
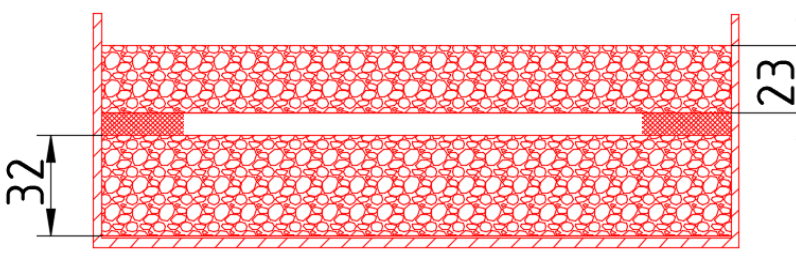
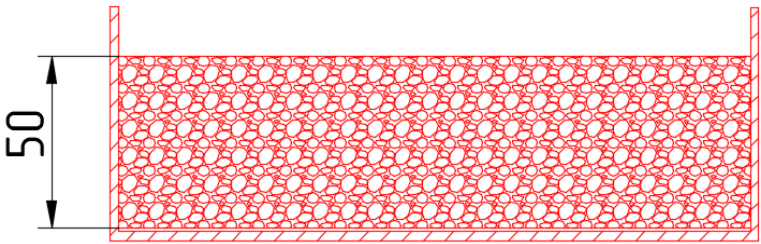
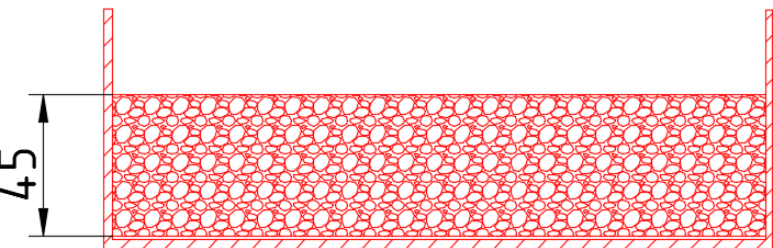
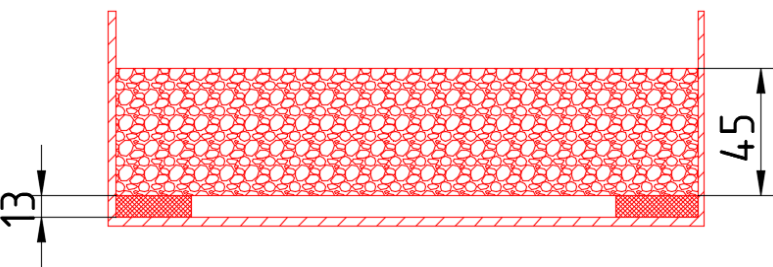
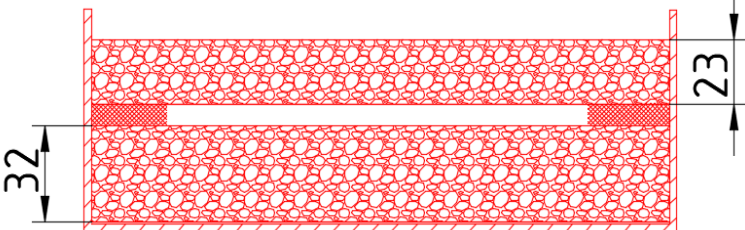
	1630,6	0,63
	341	0,13
	184	0,071

Таблица 2.10 - Обобщенные результаты экспериментальных исследований прочностных и энергетических характеристик горных пород при их разрушении индентором острой формы

Схема	Энергия разрушения, Дж	Доля энергии от разрушения образца без дефекта
	2586	1,0
	1002	0,63
	340	0,13
	180	0,07

После обработки результатов серии экспериментов сделаны следующие выводы:

1. Наличие макротрещин в массиве породы приводит к существенному снижению энергии её разрушения зубцами шарошечных долот.

2. Энергия разрушения породы с макротрещиной зависит от толщины слоя находящегося между индентором и трещиной, и составляет от 7 до 13% от величины энергии разрушения сплошного массива.

3. Величина энергии разрушения породы существенно зависит от скорости её передачи от индентора к породе (на практике это проявляется при разной высоте опускания индентора на забой, например при наличии пустот).

4. От скорости передачи энергии от индентора к породному массиву (высоте опускания) также зависит и величина напряжения в телах качения подшипников долот и их ресурс.

5. Для уточнения научных результатов требуется исследования с большим охватом статистического материала и с меньшим шагом высоты и массы груза.

## **3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **3.1 Сетевая модель выполнения работы**

Работа выполнялась с использованием сетевой модели это позволило рационально распределить время по видам работ и выполнить дипломную работу в установленном учебным графиком срок.

В основе сетевого планирования и управления (СПУ) лежит сетевая модель графическое изображение событий и работ, которое получило название сетевого графика.

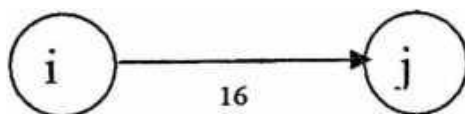
Целью применения СПУ является разработка оптимального или достаточно близкого к нему варианта выполнения работ, обеспечивающего рациональную увязку во времени и пространстве выполняемых работ, наилучшее использование ресурсов, а также эффективное управление процессом реализации этого плана.

Элементами сетевого графика, построенного в форме работа-стрелка, являются работа, событие, путь.

Работа (операция) - основной элемент сетевого графика. Различаются действительная работа, работа-ожидание и фиктивная работа.

Действительная работа - это трудовой процесс, в котором участвуют люди, машины, потребляются материально - технические и денежные ресурсы (устройство перемычек, изготовление макета, монтаж металлоконструкций и т.д.). Она изображается в виде сплошной стрелки; над стрелкой пишется наименование (содержание) работы, а под стрелкой - продолжительность выполнения работы в выбранных единицах времени. Выбор единицы измерения продолжительности работы зависит от уровня руководства, которому предназначен сетевой график. Так, в проекте организации строительства в качестве единицы принимаются месяц или квартал, в проектах производства работ - дни, недели, месяцы; при планировании работы комплексных бригад - смены, часы. Продолжительности выполнения всех работ в одном сетевом

графике должны быть определены в одних единицах. Предполагается, что время течет в направлении, указанном стрелкой: хвост стрелки - начало, а острие -



окончание работы.

#### Изготовления стенда

Работа-стрелка соединяет два события:  $i$  - предшествующее и  $j$  - последующее. Пара номеров событий образуют код (шифр) работы. Первым читается номер события, стоящего в хвосте стрелки, и вторым - у острия. Как уже отмечалось, расчеты сетевых графиков и решение различных задач на их основе выполняются на ЭВМ, при этом машина различает работы только по их коду. Продолжительность работы обозначается  $t_{ij}$ .

Ожидание - работа, для выполнения которой требуется только время, ресурсы при этом не тратятся (твердение бетона, наполнение водохранилища). Работа - ожидание изображается так же, как и действительная работа.

Фиктивная работа - вспомогательный элемент сетевого графика, позволяющий сделать график более удобным для восприятия, правильно указать организационные и технологические связи между работами. Фиктивная работа не потребляет ресурсов и продолжительность ее равна нулю. Обозначается она пунктирной стрелкой.

Событие- есть факт окончания одной работы и начала другой. Событие обычно изображается кружком, в котором указан номер.

Событие не связано с потреблением ресурсов и продолжительность его равна нулю. Считается, что работа выходит из одного события и входит в другое.

Различают начальные и конечные события. Конечное событие иногда называют целью. По числу конечных событий различают одно- и многоцелевые сетевые графики.

Путь - это последовательность работ в сетевом графике, при которой окончание предшествующей работы совпадает с началом последующей.

Для работы или события существует предшествующий путь, ведущий из начального события к данному или из начального события к событию, предшествующему данной работе.

Аналогично для работы и события существуют последующие пути, связывающие данное событие с конечным или событие, последующее за данной работой, с конечным.

Полный путь связывает начальное событие с конечным. Самый длинный полный путь называется критическим.

Сетевой график в форме работа - стрелка получил наибольшее распространение, так как содержит текстовую информацию (наименования работ, указанных над стрелками) и облегчает восприятие графика человеком.

Для обработки на ЭВМ график должен быть представлен в форме, «понятной» для машины. Наиболее распространенной является так называемая списочная форма задания сетевого графика.

Каждая строка таблицы содержит информацию об одной работе графика. Число строк равно числу работ в сетевом графике (для сети в форме работа-стрелка включаются и фиктивные работы). В первой колонке записаны начальные числа кодов работ  $I$ , во второй - конечные числа этих кодов  $j$ , в третьей колонке - продолжительность выполнения этих работ  $t_{ij}$ .

Число столбцов может быть большим: например, в дополнительном столбце можно указать число рабочей силы, занятой на выполнении работы, количество материально-технических ресурсов, потребляемых на работе, и т.д.

Все события (вершины) в сетевом графике в форме работа-стрелка должны быть пронумерованы. Предпочтительной является так называемая упорядоченная нумерация, при которой номер вершины, стоящей в начале дуги (в хвосте стрелки), будет меньше номера вершины, стоящей в конце дуги (у острия стрелки), т.е. для любой дуги  $i < j$ . Большинство алгоритмов, по которым производятся расчеты, связанные с сетевыми графиками, ориентированы



именно на упорядоченную нумерацию вершин.

Упорядочение вершин может быть выполнено самой ЭВМ по специальной программе. При списочном задании сетевого графика упорядочение производится вручную до записи информации на машинные носители. Для этого применяется алгоритм, который называется способ вычерчивания выходящих дуг. Он состоит в следующем: на графике отыскивается вершина (или вершины), не имеющая входящих дуг; этой вершине (вершинам) присваивается очередной порядковый номер (очередные порядковые номера); вычеркиваются все дуги, выходящие из отмеченной вершины (из отмеченных вершин) и в предположении, что вычеркнутых дуг больше нет, алгоритм начинают сначала, пока не будет пронумерована последняя вершина.

Формальные правила построения сетевых графиков являются общими для всех сетевых графиков независимо от того, какие проекты они моделируют; строительство гидроузла, разработку проекта турбогенератора или организацию учебного процесса в вузе. Соблюдение правил позволяет применять к обработке всех сетевых графиков одни и те же алгоритмы и программы для ЭВМ.

**Правило 1.** Ни одна работа в сетевом графике не может начаться прежде, чем будут окончены все без исключения предшествующие ей работы. Следствием этого правила является требование, чтобы в сетевом графике не было циклов.

**Правило 2.** В сетевом графике не должно быть двух и более работ, имеющих одинаковый код (это правило называют правилом изображения параллельных работ, т.е. таких, которые могут выполняться одновременно). Так как ЭВМ различает работы только по коду, то она не сумеет отличить в данном случае одну работу от другой. Для правильного изображения этого фрагмента нужно ввести два дополнительных события и две фиктивные работы. В форме стрелка-связь фиктивных работ не требуется.

**Правило 3.** В сетевом графике не должно быть ни одного события, кроме начального, не имеющего предшествующих работ.

**Правило 4.** В одноцелевом сетевом графике не должно быть ни одного события, кроме конечного, не имеющего последующих работ.

**Правило 5.** Правило изображения сложных работ. Сложной может называться работа, выполнение части которой достаточно для начала одной из последующих работ. Для сокращения общей продолжительности выполнения проекта сложная работа должна быть поделена на простые, и последующие работы должны начинаться сразу, как только это физически окажется возможным.

**Правило 6.** Правило употребления фиктивных работ. Как уже отмечалось, фиктивные работы - это вспомогательный элемент при изображении сетевых графиков в форме работа - стрелка. В ряде случаев в сетевой график целесообразно ввести дополнительные фиктивные работы, которые будут избыточными, но позволят сделать график более наглядным.

Однако при этом следует помнить, что увеличение числа фиктивных работ соответственно увеличит объем работы по подготовке исходных данных для расчета сетевого графика и время расчетов. Таким образом, следует стремиться к тому, чтобы по крайней мере не вводить совершенно бесполезные фиктивные работы.

Временной характеристикой всего сетевого графика является продолжительность критического пути  $T_{кр}$ . В одноцелевом графике существует по крайней мере один критический путь, хотя таких путей может быть и несколько. Возможны случаи, когда все пути в сетевом графике будут критическими. В многоцелевом сетевом графике минимальное количество критических путей равно числу конечных событий (целей), причем продолжительности этих путей могут быть разными.

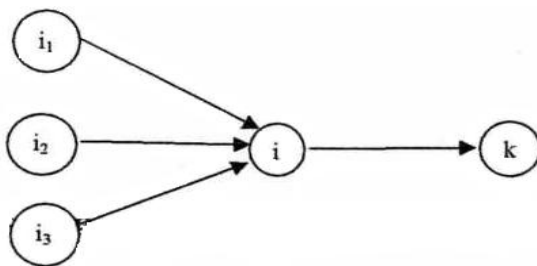
Для каждой работы в сетевом графике определяют 6 временных параметров:  $t_{ij}^{рн}$  - раннее начало;  $t_{ij}^{ро}$  - раннее окончание;  $t_{ij}^{пн}$  - позднее начало;  $t_{ij}^{по}$  - позднее окончание;  $R_{ij}^n$  - полный резерв времени;  $R_{ij}^c$  - свободный резерв времени.

Раньше начала и ранние окончания находятся в процессе расчета графика от начального события к конечному. Раннее окончание работы связано с ее

ранним началом зависимостью:  $t_{ij}^{po} = t_{ij}^{pn} + t_{ij}$ .

где  $t_{ij}$ - продолжительность выполнения работы.

**Раннее начало работы-** есть самый ранний срок, в который работа может начаться. Численно он равен продолжительности самого длинного предшествующего данной работе пути. Как бы много ни было этих предшествующих путей им всегда



Будет принадлежать работы, непосредственно предшествующие данной.

Из рисунка и первого правила построения сетевых графиков следует, что

$$t_{jk}^{pn} = \max \{ t_{ij}^{po} \}$$

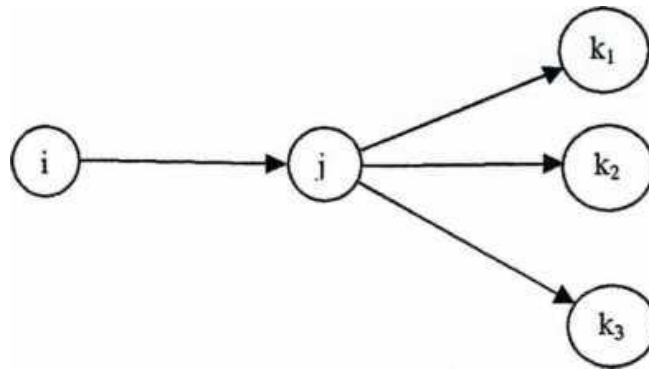
Вычисления по этой формуле производятся шаг за шагом в направлении от начального события к конечному.

Вычисления по этой формуле производятся шаг за шагом в направлении от начального события к конечному.

Поздние начала и поздние окончания отыскиваются в процессе расчета графика «ходом назад» - от конечного события к начальному. Они связаны зависимостью

$$t_{ij}^{pn} = t_{ij}^{po} + t_{ij}$$

**Позднее окончание работы** определяет самый поздний срок, в который работа может окончиться, не увеличивая продолжительности критического пути. Численно позднее окончание работы равно разности между продолжительностью критического пути и самого длинного последующего за данной работой пути. Как бы много ни было таких путей им всегда будут принадлежать работы, непосредственно последующие за данной.



В соответствии с определением и рисунком следует, что

$$t_{jk}^{no} = \min \{ t_{ik}^{ph} \}$$

Действительно, если из постоянной продолжительности критического пути вычитать длины разных по продолжительности путей, то минимум разности получится тогда, когда будет вычитаться путь максимальной длины. Вычисления по этой формуле происходят шаг за шагом от конечного события к начальному.

Полный резерв времени работы показывает, на какой промежуток времени можно отодвинуть сроки выполнения работы вправо (в сторону их увеличения), не увеличивая продолжительности критического пути:

$$R_{ij}^n = t_{ik}^{no} - t_{ij}^{po} = (t_{ij}^{ph} + t_{ij}) - (t_{ij}^{ph} + t_{ij}) = t_{ij}^{ph} + t_{ij}$$

Если на какой то работе использован весь полный резерв времени, то по крайней мере один из последующих за данной работой путей станет критическим.

Свободный резерв времени определяет промежуток времени, на который можно отодвинуть сроки выполнения работы вправо, не меняя ранних начал последующих за ней работ, и вычисляется как

$$R_{ij}^c = t_{ik}^{ph} - t_{ij}^{po}$$

Так как работы  $jk$ , последующие за работой  $ij$ , все равно не могут начаться раньше, чем это определено их ранним началом  $t_{ik}^{ph}$ , то использование свободного резерва на данной работе никак не отражается на сроках выполнения последующих работ.

Между резервами времени, которыми располагают работы, существует

соотношение

$$R_{ij}^n \geq R_{ij}^c$$

Кроме того, резервы не отрицательны:  $R_{ij}^n \geq 0$  и  $R_{ij}^c \geq 0$ .

Работы, принадлежащие критическому пути, имеют резервы времени, равные нулю, т.е. для них  $R_{ij}^n = R_{ij}^c = 0$ .

При расчете сетевых графиков в табличной форме используется списочная форма задания сетевого графика в котором указываются цифровые коды  $i$  и  $j$  продолжительность работ  $t_{ij}$ .

Обязательна упорядоченная нумерация событий. Работы заносятся в список в порядке возрастания первых чисел их кодов  $i$ , при этом вначале записываются все работы, выходящие из 1-го (начального) события и имеющие первое число кода 1, затем - все работы, выходящие из 2-го события (начальное число кода - 2); потом из 3-го и т.д. Работы, выходящие из одного события, заносятся в список в порядке возрастания вторых чисел их кодов  $j$ . Так, если из события 5 выходят работы 5-6, 5-9, 5-8, то в список они должны заноситься в порядке 5-6, 5-8, 5-9.

При упорядоченной нумерации событий (для всех работ) и соблюдении правил занесения работ в список для любой работы  $ij$  вся информация о предшествующих работах будет расположена в строках таблицы, находящихся выше той, в которой записана информация о данной работе. При этом работы, непосредственно предшествующие данной, последним числом кода будут иметь  $i$ , т.е. начальное число кода данной работы. Вся информация о работах, последующих за работой  $ij$ , будет записана в строках таблицы, лежащих ниже. При этом работы, непосредственно последующие за данной, первым числом кода будут иметь  $j$ , т.е. последнее число кода данной работы.

Цель расчета состоит в определении ранних и поздних сроков выполнения работ, резервов времени, которыми располагают работы, а также в индикации критического пути и определении календарных сроков выполнения работ, например по их ранним началам.

Расчет ранних сроков выполнения работ производится «ходом вперед», что соответствует движению в направлении от первой строки к последней. Алгоритм расчета ранних сроков следующий:

- 1) определяются ранние начала работ, выходящих из начального события (первое число кода этих работ  $i = 1$ );
- 2) по формуле находятся ранние окончания тех работ, для которых определены их ранние начала (если определено раннее окончание последней работы, переходят к п.4);
- 3) по формуле определяются ранние начала работ, первое число кода которых равно  $i + 1$  (переход к п.2);
- 4) конец.

Продолжительность критического пути равна максимальному из чисел 5-го столбца таблицы.

Расчет поздних сроков выполнения работ ведется «ходом назад». Алгоритм расчета поздних сроков такой:

- 1) определяется позднее окончание работ, входящих в последнее событие (последнее число кода этих работ равно числу событий в графике  $j$ ), оно равно продолжительности критического пути;
- 2) по формуле находятся поздние начала работ, для которых найдены их поздние окончания, если определено позднее начало работы, код которой записан в первой строке, переходят к п.4;
- 3) по формуле находятся поздние окончания работ, последнее число кода которых равно  $j - 1$ , переход к п.2;
- 4) конец.

Далее следует расчет резервов времени, который можно выполнять в произвольном порядке. Однако целесообразно вначале вычислить полные резервы времени и если они окажутся равными нулю, то для этих работ можно будет не вычислять свободных резервов, ибо последние будут равны нулю.

По формуле определяют свободные резервы для всех остальных работ.

Исходные данные для расчета сетевого графика изготовления стенда приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Перечень работ

Код работы	Наименование работы	Код события	Наименование события	Продолжительность работы, дн
1 -2	Изучение литературы	2	Устройство и принцип действия изучено стенда	5
2-3	Составление технического задания	3	Изучены технические характеристики	5
2 - 12	Изучение литературных	12	Составление пояснительной	4
3-4	Поиск материалов	4	Материалы выбраны	5
4-5	Создание эскизного	5	Эскиз готов	10
5-6	Закупка материалов	6	Подготовка к использованию материала	5
6-7	Обработка материала	7	Материал готов к	10
7-8	Изготовления узлов	8	Узлы изготовлены	15
8-9	Соединение узлов	9	Узлы собраны	2
9 - 10	Конструирование	10	Конструкция готова	10
10 - 11	Монтаж и наладка стенда	11	Установка готова	2
11 - 12	Окраска макета	11	Окрашен по ГОСТ	2
12 - 13	Составление пояснительной записки	12	Пояснительная записка готова	10
13 - 14	Защита дипломного	14	Диплом защищен	1

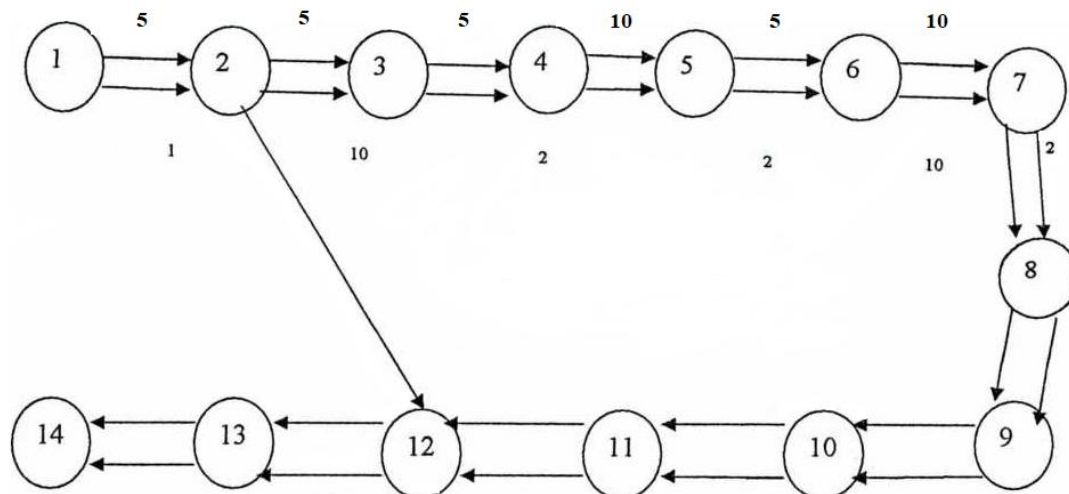


Рисунок 3.1 - Сетевой график процесса выполнения дипломной работы

Таблица 3.2 - Расчет параметров сетевого графика табличным методом

Предшествующее событие	Последующее событие	Продолжительность работы	Раннее начало работ	Раннее окончание работ	Позднее начало работ	Позднее окончание работ	Полный резерв времени работ	Частный резерв времени работ
$i$	$j$	$t_{ij}$	$t_{p.n.}(ij)$	$t_{p.o.}(ij)$	$t_{п.н.}(ij)$	$t_{п.о.}(ij)$	$Rn_{(ij)}$	$Ч_{(ij)}$
1	2	5	0	5	0	5	0	0
2	3	5	5	10	5	10	0	0
2	12	4	5	40	5	42	2	35
2	3	5	10	15	10	15	0	0
3	4	5	15	20	15	20	0	0
4	5	10	20	30	21	31	1	10
5	6	2	30	32	31	33	1	2
6	7	2	32	34	32	34	1	0
7	10	2	34	36	36	38	2	2
8	9	2	38	40	38	40	0	0
9	11	2	40	42	40	42	0	0
10	12	2	42	44	42	44	0	0
11	12	2	40	44	44	46	2	4
12	13	10	44	54	44	54	0	0
13	14	1	54	55	54	55	0	0



$i$  - предшествующее событие;

$j$  - последующее событие;

$t_{ij}$  – продолжительность работы

$t_{p.n.(ij)}$  – раннее начало работ;

$t_{p.o.(ij)}$  – раннее окончание работ;

$t_{п.н.(ij)}$  – позднее начало работ;

$t_{п.о.(ij)}$  – позднее окончание работ;

$Rn_{(ij)}$  – полный резерв времени работ;

$Ч_{(ij)}$  – частный резерв времени работ;

Для расчета полного и частного резервов времени работ используются следующие формулы:

$$Rn_{(ij)} = t_{п.о.(ij)} - t_{p.o.(ij)}$$

$$Ч_{(ij)} = t_{p.n.(jh)} - t_{p.o.(ij)}$$

где  $t_{p.n.(jh)}$  раннее начало последующей работы.

Выводы: Сетевой график изготовления стенда (рисунок 3.1) имеет пути:

$L_1: 1-2-12-13-14; t_{L1} = 51$  дн.

$L_2: 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14; t_{L2} = 55$  дн.

Критический путь равен 55 дней и не имеет резервов времени.

Для расчета резервов времени событий необходимо определить ранние и поздние сроки наступления событий.

Таблица 3.3 - Расчет ранних и поздних сроков свершения событий и резервов времени событий

Код событий	$t_{pi}$	$t_{ia}$	$Ri$
1	0	0	0
2	5	5	0
3	10	10	0
4	15	15	0
5	20	20	0
6	30	31	1

7	32	33	1
8	34	34	0
9	36	48	2
10	40	40	0
11	42	42	0
12	44	46	2
13	54	54	0
14	55	55	0

### 3.2 Смета затрат на изготовление стенда

Себестоимость продукции - это стоимостная оценка используемых в процессе производства продукции природных ресурсов, сырья, материалов, топлива, энергии, основных фондов, трудовых ресурсов, а также других затрат на её производство и реализацию. Состав себестоимости регламентируется Постановлением Правительства РФ №552 от 05.08.92 г. с учетом изменений и дополнений №661 от 01.07 95 г. и главой 25 Налогового кодекса РФ

- 1) Материальные затраты (за вычетом стоимости возвратных отходов);
- 2) Затраты на оплату труда (все виды оплаты труда и другие выплаты);
- 3) Отчисления на социальные нужды;
- 4) Амортизация основных фондов;
- 5) Прочие денежные затраты.

Таблица 3.4 - Расчет стоимости материалов, необходимых для изготовления стенда

Наименование	Размеры (см)	Количество (шт,кг)	Стоимость, одной шт.руб	Всего затрат,руб.
Профиль AL Прям/труб.	40x20x2000	3	382	1146

Профиль AL Квад/труб.	14x14x2000	4	124	496
Труба AL	25x25x2000	2	220	440
Труба AL	22x22x2000	2	227	452
Пластина крепежная	2x4x40	2	55	110
Формочка для образца	14x6x10	1	115	115
Пластина соединительная	2x8x24	1	76	76
Угол соединительный	2x8x24	1	43	43
Держатель трубы d25	5,5x5x5,5x4	4	126	504
Винты оцинк.пкр.гол. M5x60	13x6,5x1,5	15	21	315
Анкерный болт с кольцом 8x45	16x1,5x8,5	3	53	159
Уголок бытовой	3x1,4x3	6	8	48
Уголок бытовой	12x2x5,5	4	54	216
Лист алюм.	0,15x30x60	1	750	750
Гайка M4	11x14x11	0,180	297	53,5
Гайка M5	5x5x21	0,56	207	115,9
Гайка M10	18x18x22,5	0,024	195	4,68
Рым-гайка	11,7x6x2,2	3	35	105
Шайба M5	5x5x21	0,134	265	265
Шайба M10	5x5x21	0,032	255	8,16
Профиль AL/квадрат	14x14x2000	4	124	496
Профиль AL/прямоуг	12x25x2000	1	310	310
Профиль AL/ угол	50x20x2000	1	290	290
Уголок быт	12x2x5,5	4	54	216
Капролон d40		0,780	455	355
Блок Газабетонный Д500	625x250x200	1	129	129
Безмен 100кг	206x45	1	200	200
Безмен 25кг	185x35	1	90	90
Лента конвейерная	4x300x500	0,260	1287	334,62
Керн	3,2x40x90	2	87	174
Итого	-	-	-	7160

### 3.3 Расчет заработной платы рабочих

В таблице 3.5 представлен расчет заработной платы.

Таблица 3.5 - Расчет заработной платы

Должность	Количество отработанных часов	Стоимость отработанного часа, руб	Заработная плата,руб.
Сварщик	8	250	2000
Слесарь	56	150	8400
Итого	-	-	10400

Страховые взносы в ГВФ: это 30,2% от заработной платы работника.

$$Стр.с_г = 2000 * 0,302 = 640 \text{ руб.}$$

$$Стр.сл = 8400 * 0,302 = 2688 \text{ руб.}$$

Итого: общие страховые взносы в ГВФ составляют 2688 рубля.

Амортизационные отчисления.

Ежегодную сумму амортизационных отчислений рассчитывают следующим образом:

$$A = \frac{C_{перв}}{H_a} \quad (3.1)$$

где  $A$  - ежегодная сумма амортизационных отчислений;  $C_{перв}$  - первоначальная стоимость объекта;  $H_a$  - норма амортизационных отчислений.

Норма рабочего времени на 2018 год при 40-часовой рабочей недели - 1970 часов.

где  $A$  - ежегодная сумма амортизационных отчислений;  $C_{перв}$  - первоначальная стоимость объекта;  $H_a$  - норма амортизационных отчислений.

Таблица 3.6 - Расчет амортизации основных средств

Объект основных средств	Первоначальная стоимость, руб.	Норма амортизации, %	Сумма годовой амортизации, руб.	Амортизация за период работы, один день руб.
Сварочный аппарат	8000	25	2000	5,55
Шлиф. машинка	5500	25	1375	3,81
Токарный станок	200000	25	50000	138,8
Итого				148,2

Смета суммарных затрат на изготовление стенда представлена в таблице 3.7

Таблица 3.7 - Смета затрат на изготовление стенда

Элементы	Сумма, руб.
Материалы:	7160,86
Заработная плата:	10400
Страховые взносы в ГВФ	2688
Амортизационные отчисления	148,2
Всего:	20397

Вывод: Разработана сетевая модель выполнения работы. Критический путь составляет 55 дней, что свидетельствует о выполнении работы в установленный учебным графиком срок. Составлена смета затрат на выполнение работы, равная 20397 рублей.

## **4 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

### **4.1 Правила безопасности при проведении экспериментов**

Экспериментальная установка должна обеспечивать безопасность работающих при монтаже (демонтаже), вводе в эксплуатацию и эксплуатации, как в случае автономного использования, так и в составе технологических комплексов при соблюдении требований.

Требования безопасности к экспериментальной установке, устанавливаются на основе требований настоящего стандарта ГОСТ 12.2.003-91 «Общие требования безопасности»:

- особенностей назначения, исполнения и условий эксплуатации;

- результатов испытаний, а также анализа опасных ситуаций, имевших место при эксплуатации аналогичного оборудования;

- требований стандартов, устанавливающих допустимые значения опасных и вредных производственных факторов;

- прогноза возможного возникновения опасных ситуаций на вновь создаваемом или модернизируемом оборудовании.

Требования безопасности к экспериментальной установке должны также учитывать возможные опасности, вызванные совместным функционированием единиц производственного оборудования, составляющих комплекс.

Экспериментальная установка в процессе эксплуатации не должно загрязнять природную среду выбросами вредных веществ в количествах выше допустимых значений, установленных стандартами и санитарными нормами.

#### **4.1.1 Требования к конструкции установки и ее отдельным частям**

Материалы конструкции установки не должны оказывать опасное и вредное воздействие на организм человека на всех заданных режимах работы и предусмотренных условиях эксплуатации, а также создавать пожаровзрывоопасные ситуации.

Конструкция экспериментальной установки должна исключать на всех предусмотренных режимах работы нагрузки на детали и сборочные единицы, способные вызвать разрушения, представляющие опасность для работающих.

Если возможно возникновение нагрузок, приводящих к опасным для работающих разрушениям отдельных деталей или сборочных единиц, то производственное оборудование должно быть оснащено устройствами, предотвращающими возникновение разрушающих нагрузок, а такие детали и сборочные единицы должны быть ограждены или расположены так, чтобы их разрушающиеся части не создавали травмоопасных ситуаций.

Конструкция экспериментальной установки и его отдельных частей должна исключать возможность их падения, опрокидывания и самопроизвольного смещения при всех предусмотренных условиях эксплуатации и монтажа (демонтажа). Если из-за формы экспериментальной установки, распределения масс отдельных её частей и(или) условий монтажа (демонтажа) не может быть достигнута необходимая устойчивость, то должны быть предусмотрены средства и методы закрепления, о чем эксплуатационная документация должна содержать соответствующие требования.

## 4.2 Инструкция по безопасности

Настоящая инструкция распространяется для проведения опытов на экспериментальной установке и устанавливает требования безопасности при их проведении.

Инструкция обязательна для студентов, проводящих опыты на экспериментальной установке.

### Общие требования безопасности

- Для проведения опытов на экспериментальной установке допускаются лица, достигшие 18-летнего возраста, годные по состоянию здоровья.

- Порядок и виды обучения работающих по технике безопасности определяются в соответствии с ГОСТ 12.0.004-91.

- Помещения лабораторий должны быть оборудованы в соответствии с требованиями "Правил безопасности при проведении опытов"

- Эффективность вентиляции должна соответствовать требованиям санитарных норм и правил (СН 245-71), концентрация пыли не должна превышать предельно допустимых в соответствии с ГОСТ 12.1.005-91.

- Опыты проводимые при неисправной или выключенной вентиляции не допускаются.

- Лаборатория должна быть обеспечена аптечкой для оказания первой помощи при порезах, ожогах, отравлениях. Медикаменты необходимо постоянно обновлять в установленные сроки.

- Персонал проводимый опыты на экспериментальной установке должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты.

- Все помещения должны иметь внутреннюю отделку, исключаящую накопление пыли и сорбцию паров токсических веществ, и допускающую



уборку любым способом (вакуумным, влажным). Полы должны иметь нескользкую поверхность и легко очищаться.

- Отходы производства (отработанный керн, монолиты) и мусор должны регулярно удаляться в контейнеры с плотно закрывающимися крышками и установленными на специальных площадках не ближе 30 метров от производственных и жилых зданий.

#### **4.2.1 Требования безопасности перед началом работ**

Перед началом работы каждый работник обязан:

- 1) подготовить рабочее место, освободив его от ненужных предметов;
- 2) подробно ознакомиться со свойствами веществ, с которыми нужно проводить работы;
- 3) проверить исправность оборудования и аппаратуры - вентиляции;
- 4) включить вентиляцию;
- 5) подготовить средства индивидуальной защиты, необходимые для выполнения работ;
- 6) приготовить в нужных количествах реактивы, лабораторную посуду;
- 7) проверить наличие защитных ограждений на оборудовании и приборах.
- 8) Рабочее место должно иметь достаточную освещенность, проходы должны быть свободными.

**При осмотре оборудования и приборов необходимо проверить:**

- 1) наличие ограждений на движущихся и вращающихся узлах оборудования;
- 2) пневматические линии и приборы, работающие под давлением;
- 3) детали компрессионных приборов для выяснения их деформации;

4) состояние предохранительных устройств;

5) наличие знаков безопасности.

### **Требования безопасности во время работы:**

- Работы по определению физико-механических свойств пород.

- Работы, связанные с эксплуатацией оборудования и приборов под давлением, необходимо проводить с соблюдением Правил устройства и безопасной эксплуатации стационарных компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов, Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

- Детали экспериментальной установки необходимо периодически осматривать, при необходимости заменять их новыми.

- При укладке грузов на подвеску следует следить, чтобы выступ груза входил в выточку следующего. Это предохранит грузы от обрушения.

При укладке породы в формочку следует следить, чтобы она была зажата

- Для предохранения рук от механических заноз и защемления, загрузку и разгрузку породы необходимо производить в суконных перчатках.

- Ударные работы, связанные с выделением пыли (кварцевой, силикатной, слюистой) необходимо производить в специально оборудованных помещениях.

- Экспериментальная установка должна быть оборудована индивидуальным вытяжным устройством, прочными защитными ограждениями.

### **При работе ударного оборудования запрещается:**

1) регулировать размер выходной щели;

2) проталкивать застрявшие куски пород;

3) производить чистку, смазку оборудования;

4) касаться движущихся частей;

5) работать без средств индивидуальной защиты (спецодежды, рукавиц, предохранительных очков, брезентовых фартуков, противопыльных респираторов).

**При работах, связанных с выделением пыли, необходимо соблюдать следующие требования:**

1) перед началом работы необходимо нанести защитный крем на лицо и руки;

2) запрещается производить эти работы лицам с воспалением слизистой оболочки носа, глаз, а также при выраженной аллергии к ним;

3) в помещениях необходимо проводить влажную уборку ежедневно.

4) дробление пород ручным способом допускается только в закрытых ступах, при этом дробильщик должен пользоваться предохранительными очками.

### **Требования безопасности по окончании работ**

После окончания работ в лаборатории необходимо выполнять следующие требования:

1) убрать свое рабочее место, навести порядок и чистоту;

2) средства индивидуальной защиты поместить в специально отведенный шкаф;

3) выключить вентиляцию и электронагревательные приборы;

4) тщательно вымыть руки;

5) после работы с грунтами, отобранными с загрязненных участков, обработать руки этиловым спиртом;

6) выключить освещение, общий рубильник.

## **Требования безопасности в аварийных ситуациях**

Немедленно прекратить работу и поставить в известность руководителя лабораторных работ в случае:

- получения студентом (сотрудником) травмы;
- возникновения аварийной ситуации, препятствующей продолжению лабораторных работ;
- возникновения пожара или предпосылки к его возникновению;
- неисправности оборудования, аппаратуры, измерительных приборов, заземляющих устройств и др.

### **В случае получения травмы, необходимо:**

- освободить пострадавшего от действия травмирующего фактора;
- обстановку на месте аварии сохранить такой, какой она была в момент происшествия, если это не угрожает опасностью другим;
- оказать пострадавшему первую до врачебную помощь;
- вызвать к пострадавшему скорую медицинскую помощь;

### **В случае возникновения пожара, необходимо:**

- вывести студентов и сотрудников из аудитории;
- данный участок обесточить общим рубильником на электрическом силовом щите;
- немедленно сообщить о пожаре и месте его нахождения дежурному пожарной охраны университета;

- принять меры к тушению возгорания имеющимися в наличии противопожарными средствами (огнетушитель, песок). Электроустановки под напряжением тушить (после отключения электроэнергии) только углекислотными или порошковыми огнетушителями.

**В случае аварии или ситуации, препятствующей продолжению экспериментов:**

- в случае короткого замыкания - немедленно отключить питающее напряжение на центральном электрическом силовом щите лаборатории. Ремонт электрооборудования должен производиться электротехническим персоналом, имеющим не менее чем 3 группу по электробезопасности;

- при наличии запаха газа в помещении или при случайных проливах ЛВЖ, необходимо не зажигать огня, не включать освещение выключателем внутри помещения, обесточить электрооборудование общим рубильником вне помещения. До полного проветривания помещения и устранения места пропускания газа к работе не приступать;

- в случае прорыва системы водяного отопления, протечки воды с верхнего этажа, отслоения потолочной штукатурки - удалить студентов из аудитории, выключить напряжение общим рубильником, немедленно сообщить о случившемся дежурным службам университета и администрации кафедры и действовать по ее указаниям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После обработки результатов серии экспериментов, сделаны следующие выводы:

1. Наличие макротрещин в массиве породы приводит к существенному снижению энергии её разрушения зубцами шарошечных долот.

2. Энергия разрушения породы с макротрещиной зависит от толщины слоя находящегося между индентором и трещиной, и составляет от 7 до 13% от величины энергии разрушения сплошного массива.

3. Величина энергии разрушения породы существенно зависит от скорости её передачи от индентора к породе (на практике это проявляется при разной высоте опускания индентора на забой, например при наличии пустот).

4. От скорости передачи энергии от индентора к породному массиву (высоте опускания) также зависит и величина напряжения в телах качения подшипников долот и их ресурс.

5. Для уточнения научных результатов требуется исследования с большим охватом статистического материала и с меньшим шагом высоты и массы груза.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

### Основная литература

1. Воронов, Ю. Е. Совершенствование бурового оборудования разрезом / Ю. Е. Воронов. – Кемерово: Кузбасс. гос. ун-т, 1998. – 192 с.
2. Справочник. Открытые горные работы / К. Н. Трубецкой [и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.
3. Гилев А.В. Проектирование рабочих органов и режимных параметров буровых станков для сложноструктурных горных массивов / А.В. Гилев, А.О. Шигин, В.Д. Буткин – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 312 с.
4. Симкин, Б. А. Справочник по бурению на карьерах / Б. А. Симкин, Б. Н. Кутузов, В. Д. Буткин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 224 с.
5. Калашников, А. Г. Приоритетные направления создания техники для бурения взрывных скважин на открытых горных работах / А. Г. Калашников, Б. Н. Кутузов // Горный журнал. – 1997. – № 8. – С. 28–34.
6. Техника, технология и опыт бурения скважин на карьерах / под ред. В. А. Перетолчина. – М.: Недра, 1993. – 286 с.
7. Буткин, В. Д. Основы техники и технологии бурения горных пород на карьерах: учеб. пособие / В. Д. Буткин, А. В. Гилев; ГАЦМиЗ. – Красноярск, 1995. – 208 с.
8. Подэрни, Р. Ю. Основные концепции создания бурового станка нового технического уровня / Р.Ю. Подэрни, М.Р. Хромой // Горный журнал. – 1994. – № 3. – С 35-39.
9. Сафохин, М. С. Машинист буровой установки на карьерах: учеб. пособие для учащихся профтехобразования / М. С. Сафохин, Б. А. Катанов. – М.: Недра, 1992. – 312 с.

10. Иванов, К. И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых / К. И. Иванов, В. А. Латышев, В. Д. Андреев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
11. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
12. Подэрни, Р. Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ / Р. Ю. Подэрни. – М.: Недра, 1985. – 544 с.
13. Решетов, Д. Н. Детали машин: Учебник. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
14. Буткин, В.Д. Проектирование буровых долот для открытых, земляных и строительных работ / В. Д. Буткин, А. В. Гилев и [др.]. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 240 с.
15. Белов, С. В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность) : учебник для бакалавров / С. В. Белов. — 4-е изд., перераб. и доп.– Москва: Изд-во Юрайт; ИД Юрайт, 2013.– 682 с
16. Харламов, Г.А. Безопасность производственных процессов на предприятиях машиностроения [Текст] /Под ред. Г.А. Харламова. – Москва : Новые знания, 2006. – 461 с.
17. Лапкаев, А.Г. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность труда / А.Г. Лапкаев. – Красноярск, ИПК СФУ, 2009.
18. Белов, С.В. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов / С.В. Белов, В.А. Девисилов, А.В. Ильницкая, и др.; под общей редакцией С.В. Белова.— 8-е издание, стереотипное – М.: Высшая школа, 2009. - 616 с.



## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**