

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук

На правах рукописи

ДОКУТОВИЧ МАКСИМ ИГОРЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ СЕТКИ СКВАЖИН НА КАРЬЕРАХ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научные руководители:
доктор технических наук, профессор
Крюков Георгий Михайлович;
доктор технических наук, профессор
Айнбиндер Игорь Израилевич

г. Москва, 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Особенности взрывных технологий при открытой добыче полезных ископаемых на железорудных и известковых карьерах...	10
1.1 Особенности технологии ведения горных работ на Костомукшском месторождении железных руд.....	10
1.2 Особенности технологии ведения горных работ на Мончаловском месторождении известняков и керамзитовых глин.....	22
1.3 Влияние степени дробления пород на технико-экономические показатели горных работ.....	28
1.4 Постановка научной задачи.....	30
Выводы по главе 1.....	31
2. Анализ известных моделей процессов деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ.....	32
2.1 Общие энергетические оценки формирования разных зон разрушения.....	32
2.2 Волновые теории разрушения горных пород взрывом.....	42
2.3 Феноменологическая квазистатическо-волновая модель разрушения горных пород и модель проф. В.Н. Родионова.....	43
Выводы по главе 2.....	47
3. Закономерности формирования гранулометрического состава породы в зоне регулируемого дробления.....	48
3.1 Элементы теории разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ.....	48
3.2 Модель формирования гранулометрического состава при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ в горных породах..	51

3.3 Теоретические оценки формирования кусков породы при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ.....	52
3.3.1 Выход негабарита.....	52
3.3.2 Средний размер куска в развале.....	53
3.4 Экспериментальные лабораторные исследования взрывного дробления образцов.....	54
3.4.1 Применяемое оборудование.....	54
3.4.2 Взрывчатое вещество.....	56
3.4.3 Последовательность выполнения операций при проведении опытов в лабораторных условиях.....	57
3.4.4 Лабораторные исследования взрывного дробления силикатных блоков.....	60
3.4.5 Анализ взрывного дробления силикатных блоков.....	61
3.4.6 Общие замечания.....	74
3.4.7 Лабораторные исследования взрывного дробления полигалитовых пород (скв. №3 Шарлыкской площади).....	75
3.4.8 Анализ взрывного дробления образцов из полигалитовой породы (скв. №3 Шарлыкской площади).....	86
3.4.9 Лабораторные исследования взрывного дробления полигалитовых пород (скв. №2 Восточно-Полесского объекта).....	100
3.4.10 Анализ взрывного дробления образцов из полигалитовой породы (скв. №2 Восточно-Полесского объекта).....	111
3.5 Экспериментальные натурные исследования взрывного дробления горных пород.....	119
3.5.1 Экспериментальное взрывное дробление негабаритов известняков.....	119
3.5.2 Анализ результатов взрывного дробления негабаритов известняков.....	122
Выводы по главе 3.....	132

4. Опытнo-промышленныe исследованиe взрывного дробления горных пород.....	134
4.1 Анализ результатов опытнo-промышленныx взрывов на разрезах (по данным М.Н. Оверченко).....	134
4.2 Методика расчета рациональных параметров буровзрывных работ обеспечивающая заданную степень взрывного дробления горных пород.....	139
4.2.1 Расчет параметров взрывного дробления железистых кварцитов.....	140
4.2.2 Опытнo-промышленныe исследованиe взрывного дробления известняков.....	147
4.3 Проект добычи полигалитовых пород Шарлыкской площади с помощью скважинной технологии.....	154
4.3.1 Прогнозные оценки степени взрывного дробления полигалитовых пород при взрыве горизонтальной части вертикально-горизонтальной скважины.....	156
Выводы по главе 4.....	160
Заключение.....	161
Перечень сокращений и условных обозначений.....	168
Список литературы.....	172
Приложение.....	194
Приложение 1.....	195
Приложение 2.....	196
Приложение 3.....	197
Приложение 4.....	198
Приложение 5.....	199
Приложение 6.....	201
Приложение 7.....	202
Приложение 8.....	203

Приложение 9.....	204
Приложение 10.....	207
Приложение 11.....	208

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. При разработке месторождений открытым способом эффективность производства в значительной мере определяется эффективностью проведения буровзрывных работ (БВР). Основной задачей БВР на карьерах является обеспечение заданной степени дробления горных пород (ГП). В настоящее время существуют ряд методик расчетов параметров БВР. Предполагается, что параметры БВР, выбранные по методикам обязательно должны быть скорректированы по результатам проведения опытно-промышленных серий взрывов в конкретных горно-геологических условиях того или иного карьера. Изучением процессов дробления горных пород занимались ведущие ученые – взрывники, которые позволили установить закономерности формирования разных зон разрушения, с учетом физико-технических свойств горных пород, термодинамических параметров зарядов промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) и параметров их размещения на взрываемом блоке, позволили повысить достоверность теоретических оценок формирования гранулометрического состава пород в развале и существенно снизить объемы корректировочных опытно-промышленных взрывов, время и себестоимость взрывных работ (ВР). В тоже время обоснование рациональных параметров зарядов ПВВ, обеспечивающих заданную степень взрывного дробления горных пород на карьерах, особенно при разработке карбонатных пород является малоизученной. В связи с этим представленная работа, посвященная обоснованию рациональных параметров сетки скважин на карьерах при разработке карбонатных пород, является актуальной научной задачей.

Цель работы заключается в обоснование метода расчета рациональных параметров сетки скважин на уступе карьера, обеспечивающих заданную степень взрывного дробления при разработке карбонатных пород.

Идея работы состоит в использовании установленных закономерностей взрывного дробления карбонатных пород, при применении промышленных взрывчатых веществ, для определения рациональных параметров сетки скважин

на уступе карьера, обеспечивающих формирование заданного объема взрывного дробления карбонатных пород.

Для достижения поставленной цели и реализации идеи были сформулированы следующие **задачи исследований**:

- провести анализ существующих взрывных технологий при открытой разработке полезных ископаемых на карьерах;
- провести анализ существующих теорий и моделей процессов деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов ПВВ;
- установить закономерности формирования гранулометрического состава породы в зоне регулируемого дробления карбонатных пород;
- определить условия формирования гранулометрического состава при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ в карбонатных породах;
- разработать методику расчета рациональных параметров БВР обеспечивающая заданную степень взрывного дробления карбонатных пород.

Новизна работы заключается в установлении закономерностей формирования взрывного дробления горной породы на разных расстояниях от оси взорванного заряда при взрывах в ней зарядов ПВВ.

Объектом исследования: явились руды, породы, образцы и условия разработки Костомукшского месторождения железных руд, Мончаловского месторождения известняков и керамзитовых глин и полигалитовых пород Шарлыкской площади.

Методы исследований: общий теоретической и методологической основой исследований является комплексный подход, включающий анализ и обобщение производственной и проектной практики расчета параметров взрывных работ на карьерах, анализ результатов научно-исследовательских работ по дроблению горных пород взрывом, экспериментальные исследования взрывного дробления горных пород в лабораторных условиях, апробация параметров отбойки горных пород взрывом в натуральных условиях на карьерах по добычи карбонатных пород.

Научные положения, выносимые на защиту и разработанные лично соискателем:

1. Размеры зоны интенсивного мелкодисперсного дробления пород пропорциональны диаметру заряда и корню квадратному отношения давления газообразных продуктов в детонационной волне к пределу прочности пород на сжатие;

2. Формирование объемов разрушения клиновидных секторов происходит отдельными трещинам в зависимости от прочностных свойств пород, диаметра заряда и давления продуктов детонации в детонационной волне;

3. Установление взаимосвязи между средним и максимальным размерами кусков в зоне регулируемого дробления пород при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ, определяющих рациональные параметры сетки скважин на уступе карьера.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

– удовлетворительным согласованием теоретических оценок степени дробления горных пород при взрыве заряда ПВВ с результатами соответствующих лабораторных и промышленных экспериментальных исследований;

– удовлетворительным согласованием теоретических оценок среднего размера куска и содержания негабарита во взорванной горной массе с результатами опытно-промышленного и промышленного ведения взрывных работ;

– внедрением рекомендаций по рациональным параметрам БВР при ведении взрывных работ на карьерах Костомукшского и Мончаловского месторождений;

– внедрением методики расчета степени дробления полигалитовых пород при подземных взрывах удлиненных зарядов ПВВ на больших глубинах.

Научное значение работы заключается в установлении закономерностей формирования степени дробления ГП с удалением от взорванного заряда ПВВ.

Практическое значение работы заключается в определении методики расчета рациональных параметров сетки скважин, обеспечивающих заданную степень взрывного дробления пород на карьере.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Научные результаты, рекомендации и методика. Разработано и принято: «Программа и методика оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном дроблении негабаритов

железистых кварцитов», «Рекомендации по рациональным параметрам взрывного дробления железистых кварцитов на Костомукшском месторождении железистых кварцитов на карьерах ОАО «Карельский окатыш»», «Программа и методика оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном дроблении негабаритов известняка на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»», «Рекомендации по рациональным параметрам безнегабаритного взрывного дробления известняка на Мончаловском месторождении известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»», «Руководство по выполнению практических занятий по дисциплине: «Математические методы моделирования и расчеты на ЭВМ»», «Руководство по выполнению лабораторно-практических занятий по дисциплине: «Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании»» и «Прогнозные оценки размеров зон разной степени разрушения полигалитовых пород при взрывах удлиненных зарядов ПВВ на больших глубинах».

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты исследований были доложены и получили одобрение: на Пятой международной научной конференции «Физические проблемы разрушения горных пород» (г. Санкт-Петербург, СПбГГИ, 2006 г.), на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, МГГУ, 2006, 2007, 2009 и 2014 гг.), на 7th world conference on explosives & blasting EFEE (Moscow, Russia, EFEE, 2013 г.), на 3-й и 4-й Конференциях Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубцевого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (г. Москва, ИПКОН РАН, 2018 и 2020 гг.) и на 14-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, ИПКОН РАН, 2019 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 13 статей, 9 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы из 206 наименований и 11 приложений, изложена на 209 страницах машинописного текста, содержит 89 таблиц и 21 рисунок.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОТКРЫТОЙ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ И ИЗВЕСТКОВЫХ КАРЬЕРАХ

В настоящее время на карьерах и разрезах открытым способом с помощью БВР добываются железные руды, руды цветных металлов, уголь, известняк и др. материалы.

Добыча этих материалов имеет свои особенности. Для определенности рассмотрены добыча железистых кварцитов на Костомукшском месторождении железных руд в Карелии и карбонатных пород на Мончаловском месторождении известняков и керамзитовых глин в Тверской области.

1.1 Особенности технологии ведения горных работ на Костомукшском месторождении железных руд

Рудоуправление ОАО «Карельский окатыш» разрабатывает Костомукшское месторождение железных руд открытым способом тремя участками – «Центральный», «Южный», «Северный-2», со следующими параметрами [175]:

1.1.1 Физико-технические свойства разрушаемых горных пород Костомукшского месторождения железных руд

Костомукшское месторождение железистых кварцитов находится в Карелии в 9 км от г. Костомукша, расположенном в 450 км на северо-запад от г. Петрозаводска, в 37 км от границы с Финляндией.

Костомукшский железорудный район расположен в северо-западной части Западно-Карельской структурно-фациальной зоны северной части Центрально-Карельского геоблока.

Основное рудное тело относится к нижней подсвите костомукшской свиты

и прослеживается вдоль всей структуры на протяжении 15,5 км. В Центральном участке основное рудное тело приблизительно по оси делится на две части пачкой филлитовых, кварц-биотитовых с гранитом и кварц - биотит - амфиболитовых сланцев.

Вмещающими породами со стороны лежащего бока являются кварц-биотитовые филлитовидные, биотит - кварц - амфиболитовые, тальк - хлоритовые и другие сланцы, а также безрудные кварциты.

Среди железистых кварцитов выделяются три типа природных руд:

- силикат - магнетитовые, богатые, содержащие магнетит и гематит;
- магнетит - силикатные, средние и бедные, содержащие магнетит и пирротин;
- силикатные, забалансовые, магнетитосодержащие с сульфидами.

По минеральному, химическому и гранулометрическому составу выделены четыре типа магнетитовых кварцитов:

- тип Р – щелочно - амфиболовые (рибекитовые, актинолитовые, кросситовые с эгирином, биотитом и карбонатом);
- тип Б – биотитовые (грюнерит - биотитовые, карбонат - биотитовые, рибекит - биотитовые);
- тип Г – грюнеритовые (биотит - грюнеритовые, карбонат - биотит-грюнеритовые);
- тип 2Ат – двуамфиболовые (роговообманково - грюнеритовые с биотитом и карбонатом).

Основные характеристики физико-технические свойств кристаллических пород рассматриваемого месторождения [175] определены по данным геолого-разведочных работ и результатам исследований института ВИОГЕМ и приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Физико-технические свойства руд и вмещающих пород
Костомукшского месторождения железных руд

№	Наименование поро- ды	Объемная масса, г/см ³	Пористость P, %	E*10 ⁻¹⁰	Коэф. Пуассона	Контактная прочность	Угол внутрен. трен., град	Удельное сцепление, С, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Кварциты амфибол - магнетитовые (щелочно- амфибол-магн., грюне- рит-магнетитовые)	2.86-3.71 3.29	0.09-1.4 0.41	1.66-17.1 8.3	0.06-0.42 0.22	111-457 288.5	33.3-40.5 37.1	9.8-50 21.5	27- 421 132
2	Кварциты биотит- магнетитовые	3.1-4.1 3.6	0.24-1.3 0.5	4.2-11.2 7.65	0.09-0.43 0.27	150-370 260	36.4-39.4 37.5	18.0-31.0 23	28.0- 421 131
3	Кварциты биотит- амфиболовые (безруд- ные + забал.)	2.7-3.0 2.85	-	-	-	-	-	-	72- 397 116
4	Сланцы кварц- биотитовые	-	0,2	1.66-8.50 4.30	0.11-0.37 0.21	-	24.2-41 31.1	3.64-18.4 11.1	22- 197 67.5
5	Сланцы филлитовидные (графитосодержащие с сульфидами)	2.65-2.94 2.8	0.23-0.44 0.3	1.73-13.0 4.95	0.12-0.35 0.24	87-203 145	12-46 28.1	3.9-27.0 17.5	10- 185 87.7
6	Сланцы биотит- кварцевые	2.73-3.06	0.18-0.24 0.21	2.01-4.90 3.5	0.15-0.33 0.26	-	20-40 25.5	3.2-19.2 9.4	20- 111 42.4
7	Сланцы тальк-карбонат- хлоритовые	2.78 -2.87 2.83	0.48-0.72 0.6	0.42-11.9 3.9	0.09-0.27 0.21	-	16-42 27.5	0.29-19.0 5.3	8-55 19.1
8	Геллефлинга, плагио- порфиры, плагиосланцы	2.6-2.75 2.66	0.0-2.2 0.96	1.7-8.62 5.8	0.18-0.3 0.24	224-264 244	28-40.5 36.5	3.63-36.0 18.6	77- 307 160.4
9	Зона дезинтеграции: кварциты магнетитовые	-	-	-	-	-	-	-	146- 158 152

Продолжение таблицы 1.1

№	Наименование породы	σ_p , МПа	Коэф. вн. ослабления K	Водопоглощение V , %	f - по проф. М.М. Протодьяконову	Истираемость, кг/см ³
1	2	11	12	13	14	15
1	Кварциты амфибол - магнетитовые (щелочно-амфибол-магн., грюнерит-магнетитовые)	3.7-21.7 12.2	-	0.02-0.26 0.13	2-15 7.9	0-0.1 0.05
2	Кварциты биотит-магнетитовые	6.5-27 15.3	-	0.08-0.1 0.09	9	-
3	Кварциты биотит-амфиболовые (безрудные+забал.)	-	-	0,1	5-12 8.1	-
4	Сланцы кварц-биотитовые	3.9- 12.9 9.0	0.24-0.28 0.26	0.07-0.2 0.14	3-14 8.4	0.2-0.24 0.22
5	Сланцы филлитовидные (графитосодержащие с сульфидами)	2.6- 19.6 12.6	-	0.08-0.3 0.16	2.8-10 6.2	0.24-0.32 0.28
6	Сланцы биотит-кварцевые	2.1-25.5 10.0	0.44-0.92 0.71	0.07-0.15 0.11	2-14 6.2	-
7	Сланцы тальк-карбонат-хлоритовые	2,25	0.13-0.14 0.135	0.1-0.4 0.21	1-4 2.3	1.4-1.5 1.45
8	Геллефлинта, плагио-порфиры, плагиосланцы	8.7-28.7 19.3	-	0.06-0.4 0.2	2-27 13.8	0.03-0.09 0.06
9	Зона дезинтеграции: кварциты магнетитовые	-	-	-	-	-

1.1.2 Вскрытие и система разработки Костомукшского месторождения железных руд

Система разработки - транспортная, с продольным перемещением вскрышных пород во внешний отвал (группа В-5 классификация по Е.Ф. Шешко) и сплошная продольная однобортовая (группа С классификация по В.В. Ржевскому) и формированием въездных траншей.

Около 96% всей рудной массы транспортируется на обогатительную фабрику комбинированным транспортом. Из забоев руда автомобильным транспортом доставляется до внутрикарьерных перегрузочных пунктов, где перегружается в думпкары и транспортируется железнодорожным транспортом на дробильно-обогатительную фабрику (ДОФ). Около 4% рудной массы вывозится железнодорожным транспортом непосредственно из забоя на ДОФ.

Около 16% скальных вскрышных пород транспортируется из забоя железнодорожным транспортом непосредственно в Восточный железнодорожный отвал.

Технологическая схема отработки месторождения железных руд, согласно проекта, следующая:

- бурение взрывных скважин производится буровыми станками шарошечного бурения типа СБШ-250МН и СБШ-270ИЗ; при постановке бортов в конечное положение (бурение отрезной щели) используются буровые станки Panteka-1100 с возможностью бурения отрезной щели по принципу “под себя”;

- взрывание скальной горной массы в карьере производится штатными ВВ (гранулотол, граммонит 79/21 и т.д. заводского изготовления), водонаполненными ВВ типа «Акватол» («Акватол Т-20ГК», «Акватол Т-8М»), эмульсионными ВВ (ЭВВ - «Сибирит-1200», «Сибирит-РЗ 2500», «Сибирит-1000») и другими ПВВ с учетом переводных коэффициентов. Для инициирования зарядов ПВВ используются неэлектрические системы взрывания (НСИ) «Нонель», «Примадет» и система радиовзрывания «Гром»;

- погрузка взорванной скальной горной массы в автомобильный или железнодорожный транспорт осуществляется экскаваторами типа прямая механическая лопата (ЭКГ-12, ЭКГ-10, ЭКГ-8И, ЭКГ-8Ус, ЭКГ-6,3Ус);

- рудная масса с внутрикарьерных усреднительных перегрузочных пунктов грузится экскаваторами (ЭКГ-8И, ЭКГ-6,3Ус) в железнодорожный транспорт и вывозится на ДОФ.

Основные элементы системы разработки:

I. Высота обрабатываемого уступа: - 15 м.

II. Высота уступа при постановке борта в конечное положение: - 30 м.

III. Ширина рабочих площадок:

а). при использовании железнодорожного транспорта: - 25 м;

б). при использовании автомобильного транспорта: - 34 м.

IV. Ширина берм безопасности: - 3 м.

По Центральному участку добычные работы производятся на 16 горизонтах, по Южному участку – на 9 горизонтах.

Вскрыша (скальная и рыхлая) транспортируется автотранспортом в Восточный и Западный отвалы. Вскрыша, вывозимая железнодорожным транспортом складирована в Восточный отвал. Геллефлинты складированы на южном борту Южного участка в районе ДЩУ-500 и Северо-Восточном отвале - вторым ярусом по отметке +270 м.

1.1.3 Буровые работы

Удельные затраты по буровзрывному комплексу составляют 60-70% от суммы затрат на производство горной массы. Применение скважин увеличенного диаметра уменьшает затраты на бурение, но ухудшает показатель дробления горной массы. Практика использования буровых станков СБШ-250МН с базовым диаметром долот 244,5 мм, показала достаточно хорошие технико-экономические показатели (ТЭП).

Техническая скорость бурения, V_g м/час, определяется по эмпирической формуле:

$$V_g = \frac{(35 \times P_0 \times n_g)}{n_6 \times d^2} \quad (1.1)$$

где $P_0 = 30$ т.с.- осевое усилие; $n_g = 120$ об/мин – частота вращения шарошечного долота; $n_6 = 18$ - показатель трудоемкости бурения; $d = 244,5$ мм – диаметр долота.

Подставив эти значения параметров в (1.1) получается:

$$V_g = \frac{35 \times 30 \times 120}{18 \times 244,5^2} = 11,7 \text{ м/час}$$

Сменная производительность бурового станка рассчитывается по соотношению:

$$Q_{\text{бсм}} = \frac{T_c - (T_{\text{п}} + T_{\text{р}})}{t_o \times t_b}, \text{ м/см}; \quad (1.2)$$

где $T_c = 12$ час/см - продолжительность смены (режим 12×2); $T_{\text{п}}$ - время подготовительно-заключительных операций, час/см; $T_{\text{р}}$ - время регламентированных перерывов в течение смены, ($T_{\text{п}} + T_{\text{р}} = 1,5$ час/см); t_o и t_b – основное и вспомогательное время на бурение 1 п.м. скважины, час;

$$t_b = 1 / V_g = 1 / 11,7 = 0,0854 \text{ час/м}. \quad (1.3)$$

$t_o = 2 \div 4$ мин = $0,0333 \div 0,0667$ час; $Q_{\text{бсм}} = 69,03 \div 88,44$ м/см (ср. 78,9 м/см).

Годовая производительность бурового станка рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{г}} = Q_{\text{бсм}} \times n_{\text{раб}}, \quad (1.4)$$

где $n_{\text{раб}}$ - число буровых смен в году.

Режим работы бурового цеха принят на карьере 12×2 при непрерывной рабочей неделе. Всего рабочих смен в году: $(365 \div 366) \times 2 = 731$ смена, из них 275 смен отводится на планируемые и не планируемые простои, перегоны, ППР, ВР, перестройки линий электропередач (ЛЭП) и т.п. Итого буровых смен в году отведенных непосредственно на бурение скважин, составляет: $731 - 275 = 456$ смен.

Годовая производительность одного бурового станка составляет: $Q_{\text{г}} = 78,9 \times 456 = 36000$ п.м. На весь объем бурения потребуется средне списочный парк буровых станков: $765000 \text{ п.м.} / 36000 = 21$ станок.

1.1.4 Взрывные работы

Настоящая работа посвящена оптимизации степени дробления железистых кварцитов при добычных работах, поэтому будут оптимизироваться только эти работы, а взрывное разрушение при вскрышных работах рассматриваться не будет, поскольку эти работы на рассматриваемом карьере существенно менее значимы, чем добычные.

Максимально допустимый линейный размер кусков скальных пород и руды, для нормальной работы одноковшовых экскаваторов, составляет: по скальным породам – $d_{к, порода} = 1,5$ м; а для руды – $d_{к, руда} = 1$ м.

Следовательно, куски руды и скальных пород, превышающие в поперечном сечении 1000 мм (по руде) и 1500 мм (по породе), относятся к негабаритам и подлежат вторичному разрушению. На предприятии выход негабарита считается равным 5% от объема скальной горной массы, взрываваемой скважинными зарядами. Случаи с большими и меньшими значениями выхода негабарита, обусловлены изменчивостью условий разрушаемых железистых кварцитов. Для разделки негабарита применяется метод шпуровых зарядов. Шпуры бурятся самоходным буровым станком «Коммандо-110» на глубину в $1/2 \div 1/3$ размера негабарита. В качестве ВВ используется патронированный аммонит 6ЖВ.

Опыт эксплуатации бурового оборудования на Костомукшском месторождении показывает, что применение буровых долот типа III 244,5 К ПВ и III 244,5 ОК ПВ диаметром 244,5 мм наиболее эффективно по сравнению с другими диаметрами долот и обеспечивает оптимальную степень дробления горной массы.

Значения удельного расхода ВВ на комбинате ОАО «Карельский окатыш» по скальной вскрыше* рассчитывается по эмпирической формуле:

$$q = \frac{q_0 \times K_1 \times K_2 \times K_4 \times \gamma \times K_d}{2,6} = 0,8 \text{ кг/м}^3, \quad (1.5)$$

* Впредь в диссертации будет рассматриваться оптимизация взрывных работ при добычи руды. Поэтому взрывное разрушение скальных вскрышных пород в диссертации не рассматривалось.

где q_0 - эталонный расход ВВ с теплотой взрыва 4190 кДж/кг при кондиционном размере куска 1 м для пород III категории по взрываемости [170, 175] с крепостью $f = 8 - 14$, $q_0 = 0,6$ кг/м³; K_1 - коэффициент работоспособности ВВ ГЛТ-20, $K_1 = 1,2$; $\gamma \approx 2,7$ - плотность породы, т/м³ (для вскрыши); K_d - поправочный коэффициент на размер кусков при расчетном размере кондиционного куска 1 м, $K_d = 1,0$; K_2 - поправочный коэффициент на диаметр бурения при 250 мм, $K_2 = 1,0$; K_4 - поправочный коэффициент выхода негабарита, для пород III категории по взрываемости выход негабарита составляет 1,0 - 1,5 %, $K_4 = 1,0$.

Значения удельного расхода ВВ на комбинате ОАО «Карельский окатыш» по руде рассчитывается по формуле (1.5):

$$q = \frac{q_0 \times K_1 \times K_2 \times K_4 \times \gamma \times K_d}{2,6} = 1,25 \text{ кг/м}^3, \quad (1.6)$$

где q_0 - эталонный расход ВВ при кондиционном размере кусков 1 м для пород IV категории по взрываемости [170, 175] с крепостью $f = 12 - 20$, $q_0 = 0,8$ кг/м³; γ - объемная масса железистых кварцитов, $\gamma = 3,43$ т/м³.

Расчетный удельный расход ВВ 1,25 кг/м³ практически соответствует фактическому удельному расходу для руд. При применении других ВВ, вносятся поправочные коэффициенты.

Применяемая методика расчета параметров ВР.

Определение размера линии сопротивления по подошве (ЛСПП) [175] осуществляется по полуэмпирической зависимости:

$$W = \frac{\sqrt{0,56 \times P^2 + 4 \times m \times q_p \times H_y \times P \times L_{скв}} - 0,75 \times P}{2 \times m \times q_p \times H_y}, \text{ м.} \quad (1.7)$$

где P - вместимость 1 метра скважины, кг/м; H_y - высота уступа, м; $L_{скв}$ - глубина скважины, м; m - коэффициент сближения зарядов; q_p - удельный расход ВВ, кг/м³;

$$P = 0,785 \times d_{скв}^2 \times \Delta = 7,85 \times 2,5^2 \times 0,9 = 44 \text{ кг/м}, \quad (1.8)$$

где $d_{скв}$ - диаметр скважины, м; Δ - плотность заряжения ВВ в скважине для ГЛТ-20, $\Delta = 0,9 \cdot 10^3$ кг/м³.

Иногда приближенно вместо (1.7) принимается:

$$W = k \times \sqrt{\frac{P}{q}}. \quad (1.9)$$

где: k – коэффициент, имеющий значения $0,9 \div 1,1$.

Глубина перебура: $L_{пер} = (10 - 12) \times d_{скв} = 12 \times 0,25 = 3$ м.

Глубина скважины: $L_{скв} = H_y + L_{пер} = 15 + 3 = 18$ м.

Размер ширины зоны регулируемого дробления при взрыве одного скважинного заряда ПВВ приближенно рассчитывается по полуэмпирическому соотношению:

$$W_{II} = \frac{\sqrt{0,56 \times 44^2 + 4 \times 0,85 \times 1,2 \times 15 \times 44 \times 18 - 0,75 \times 44}}{2 \times 0,85 \times 1,2 \times 15} = 6,2 \text{ м.} \quad (1.10)$$

По условиям безопасности бурения первого ряда скважин необходимо, чтобы:

$$W_{II} > W_{IIб}, \quad (1.11)$$

где $W_{IIб}$ - линия наименьшего сопротивления по подошве.

$$W_{IIб} = H_y \times ctg \alpha + l_б = 15 \times ctg 75 + 3 = 7 \text{ м,} \quad (1.12)$$

где $l_б = 3$ м - берма безопасности.

Следовательно, в рассматриваемом случае, сопоставляя (1.10) – (1.12) видим, что требования по ТБ не выполняются.

Поэтому в Типовых проектах рассматриваемого комбината применяются парно-сближенные скважины в первом ряду, которые располагаются на расстоянии $4 \div 6$ диаметров скважины друг от друга, обеспечивая проработку подошвы на $30 \div 40\%$ эффективнее, чем при взрывах одиночных скважинных зарядов ПВВ.

Длина ЛСПП для первого ряда парно-сближенных зарядов, равна:

$$W_{II} = 0,9 \times \sqrt{\frac{2 \times P}{q}} = 7,7 \text{ м,} \quad (1.13)$$

где $q = 1,2$ кг/м³ - удельный расход ВВ; $P = 44$ кг/м – вместимость 1 м скважины.

Расстояние между скважинами в ряду, принимается равным:

$$a = m \times W_{II} = 0,91 \times 7,7 = 7 \text{ м,} \quad (1.14)$$

где m - коэффициент сближения скважин в ряду, равный $0,91$.

Расстояние между рядами скважин принимается равным $b = 7$ м.

Масса заряда ВВ в первом ряду скважин:

$$Q_{пары} = q \times H_y \times W^2 \times m, \quad (1.15)$$

$Q_{пары} = 900$ кг - для двух парно-сближенных скважин.

Массы зарядов ВВ в парно-сближенных скважинах, принимаются равными:

$$1_{скв} = Q_1 = L_{зар1} \times P = 13 \times 44 = 572 \text{ кг}, \quad (1.16)$$

$$2_{скв} = Q_2 = Q_{пары} - Q_1 = 900 - 572 = 328 \text{ кг}. \quad (1.17)$$

Длина заряда 2-ой скважины:

$$L_{зар2} = Q_2 / P = 328 / 44 = 7,5 \text{ м}. \quad (1.18)$$

Длина забойки 2-ой скважины:

$$L_{заб2} = L_{скв} - L_{зар2} = 18 - 7,5 = 10,5 \text{ м}. \quad (1.19)$$

Заряды второго и последующих рядов скважин, принимаются равными:

$$Q = P \times (L_{скв} - 0,75 \times W_{II}) = 44 \times (18 - 0,75 \times 7,7) = 530 \text{ кг}, \quad (1.20)$$

$$\text{Длина заряда: } L_{зар} = Q / P = 530 / 44 = 12 \text{ м}. \quad (1.21)$$

$$\text{Длина забойки: } L_{заб} = L_{скв} - L_{зар} = 18 - 12 = 6 \text{ м}. \quad (1.22)$$

1.1.5 Выемочно-погрузочные работы

При отработке добычных уступов полезного ископаемого и скальной вскрыши с применением буровзрывных работ применяются одноковшовые экскаваторы ЭКГ-10.

Учитывая размер ковша экскаватора, максимальный размер кусков в развале должен составлять:

$$L = 0,75 \times \sqrt[3]{E} = 0,75 \times \sqrt[3]{10} = 1,5 \text{ м}. \quad (1.23)$$

где E – объем ковша экскаватора, м³.

Погрузка скальной взорванной массы выполняется:

- скальной вскрыши - в автомобили или ж/д транспорт экскаваторами типа прямая механическая лопата (ЭКГ-10, ЭКГ-12, ЭКГ-8И, ЭКГ-6,3Ус)

- рудной массы с внутрикарьерных усреднительных погрузочных пунктов экскаваторами типа прямая механическая лопата (ЭКГ-8И, ЭКГ-6,3Ус) грузится в железнодорожный транспорт.

Выше указывалось, что выход негабарита при взрывном рыхлении железистых кварцитов на Костомукшском месторождении железных руд в условиях ОАО «Карельский окатыш» с параметрами БВР рассчитанных по формулам (1.5) ÷ (1.22) составляет порядка 5%, что приводит к значительным затратам времени и средств на разделку негабарита. Здесь необходимо ещё отметить, что эффективность последующих ГР после взрывного дробления железистых кварцитов: разделка негабарита, экскавация и транспортировка горной массы, первичное дробление на обогатительных фабриках существенно зависят от степени дробления ГП [44, 52, 146, 178, 179, 201 и др.]. Что позволяет сформулировать следующую практическую задачу:

– разработать параметры БВР обеспечивающие повышение степени разрушения ГП и исключаяющие выход негабарита.

В приведенных соотношениях (1.5) ÷ (1.22) нигде на прямую не учтены зависимости параметров БВР от прочностных свойств, разрушаемых ГП $\sigma_{сж}$, $\sigma_{рас}$, $\tau_{сов}$ и др. и термодинамических параметров ПВВ. Мало того в этих полуэмпирических соотношениях введены разного рода поправочные коэффициенты, в соответствии с категориями пород и результатами обобщения большого объема ВР, выполненных на Костомукшском месторождении железных руд. Поэтому эти соотношения справедливо только для тех условий, для которых они установлены и при изменении этих условий по ним невозможно установить параметры ВР для новых условий. А также по приведенным соотношениям в принципе невозможно обеспечить заметное повышение степени взрывного дробления железистых кварцитов и снижения выхода негабарита. В частности, это обстоятельство обусловлено ещё и тем, что из всех физико-технических свойств железистых кварцитов Костомукшском месторождении железных руд в указанных выше соотношениях используются только два параметра этих свойств, а из термодинамических параметров ПВВ только коэффициент работоспособности. А как отмечалось ранее, что эффективность последующих ГР разделка негабарита, экскавация и транспортировка горной массы, первичное дробление на обогатительных фабриках суще-

ственно зависят от степени дробления ГП, то, следовательно, повышение качества взрывного дробления пород позволит существенно повысить ТЭП ГР на карьерах.

1.2 Особенности технологии ведения горных работ на Мончаловском месторождении известняков и керамзитовых глин

ООО «Карбонат» разрабатывает Мончаловское месторождение известняков и керамзитовых глин открытым способом одним участком – «Жуково», со следующими параметрами [41, 176]:

1.2.1 Физико-технические свойства разрушаемых горных пород Мончаловского месторождения известняков и керамзитовых глин

Месторождение расположено в Тверской области, в 18 км западнее г. Ржева, в непосредственной близости от д. Жукове и пос. Заволжский. Вблизи месторождения протекает р. Дунка, правый приток реки Волги [41, 135, 176].

В геологическом строении [41, 135, 176] месторождение принимает участие четвертичных и нижнекарбонových отложений. К четвертичным относятся покровные образования, озерно-ледниковые, флювиа-гляциальные отложения и морена днепровского оледенения. Нижнекарбонových отложения представлены аргиллитоподобными глина стешевского горизонта, известняками, доломитами и окремнелыми известняками протвинского горизонта.

Физико-технические свойства карбонатных пород [135, 176] рассматриваемого месторождения приведены в таблице 1.2.

Средняя объемная масса карбонатных пород – 2,4 т/м³, керамзитовых глин – 1,9 т/м³.

В [135] изложено следующее:

1. Чистые разновидности известняков, слагающие верхнюю часть полезной толщи карбонатных пород, пригодны для производства строительной извести 1 сорта и известняковой муки.

2. Доломитизированные, окремненные известняки и доломиты, залегающие в нижней части полезной толщи, пригодны для производства щебня марок "200", "400", "600" для строительных работ и для производства бутового камня.

Таблица 1.2 – Физико-технические свойства карбонатных пород Мончаловское месторождение известняков и керамзитовых глин

Показатели	Чистые известняки	Доломиты, доломитизированные известняки	Окремненные известняки
Удельная масса, т/м ³	2,61 – 2,65	2,61 – 2,70	2,66 – 2,74
Плотность, т/м ³	2,31 – 2,50	2,10 – 2,65	2,31 – 2,50
Водопоглощение, %	0,44 – 4,0	0,14 – 4,0	0,68 – 2,0
Пористость, %	4,1 – 8,0	4,1 – 8,0	4,1 – 8,0
Коэф. размягчения	-	0,68 – 0,82	-
Коэф. морозостойкости	-	0,82 – 1,12	-

1.2.2 Вскрытие и система разработки

Мончаловского месторождения известняков и керамзитовых глин

Система разработки – сплошная, поперечная, однобортная, с внешним отвалообразованием.

Все карбонатные породы транспортируется на ДОФ автомобильным транспортом.

Вскрышные породы также транспортируются из забоя автомобильным транспортом непосредственно в отвал.

Технологическая схема отработки месторождения карбонатных пород, согласно проекта, следующая:

- бурение взрывных скважин производится буровым станком пневмоударного бурения СБУ-100П;

- взрывание скальной горной массы в карьере производится ВВ изготавливаемыми на пунктах производства (гранулит РП и т.д.). При этом для инициирования зарядов ПВВ используются электродетонатор защищенный индукционный (ЭДЗИ) (с возможным использованием внутрискважинных детонаторов НСИ «Эдилин») с применением промежуточных детонаторов, опущенных в скважину;

- погрузка взорванной скальной горной массы осуществляется в автомобильный транспорт экскаватором прямой механической лопата ЭКГ-5А.

Основные элементы системы разработки:

I. Высота обрабатываемого уступа: - 12 м.

II. Ширина рабочей площадки (при использовании автомобильного транспорта) – 34 м.

III. Ширина берм безопасности: - 3 м.

По участку «Жуково» добычные работы с применением БВР производятся на 1-ом горизонте.

Вскрышные породы на Мончаловском месторождении известняков и керамзитовых глин представлены: почвенно-растительным слоем (ПРС), глинистыми и песчаными глинами («породы основной вскрыши») [135].

«Породы основной вскрыши» транспортируется автотранспортом в отвал.

1.2.3 Буровые работы

Для бурения скважин используются буровой станок (пневмоударного бурения) СБУ-100П с диаметром долота 105 мм. Диаметр взрываваемых скважин 110 мм.

1.2.4 Взрывные работы

Настоящая работа посвящена оптимизации степени взрывного дробления известняков при добычных работах, поэтому далее будут оптимизироваться только процессы их взрывного рыхления.

Максимально допустимый линейный размер кусков известняка, для эффективной работы одноковшовых экскаваторов ЭКГ-5А, составляет: – $d_{к, известняк} = 0,6$ м.

Следовательно, куски известняка, превышающие по наибольшему ребру 600 мм, относятся к негабаритам и подлежат вторичному разрушению. На предприятии выход негабарита считается равным не более 10% от объема скальной

горной массы, взрывааемой скважинными зарядами. Для разделки негабарита применяется метод шпуровых зарядов. Шпуры бурятся перфораторами на глубину в $1/2 \div 1/3$ размера негабарита. В качестве ВВ используется патронированный аммонит 6ЖВ.

В [176] значение расчетного удельного расхода ВВ, принято, исходя из многолетнего опыта ведения ВР на данном предприятии, в соответствии с фактическим удельным расходом ВВ и составляет $0,46 \text{ кг/м}^3$.

Расчеты параметров БВР на рассматриваемом предприятии выполняются в следующей последовательности [41, 176]:

Для расчета скважинных зарядов рыхления предварительно определяется величина преодолеваемого зарядом сопротивления по подошве уступа (W) по формуле (1.24) [1]:

$$W = k_1 \cdot (P / q)^{0,5} = 0,9 \cdot (P / q)^{0,5} = 0,9 \cdot (8,6 / 0,46)^{0,5} = 3,9 \text{ м.} \quad (1.24)$$

$$W < 0,8 H, \text{ м}$$

где: P - вместимость ВВ в 1 м скважины, кг/м ; q – фактический удельный расход ВВ, принимается из таблицы 26 «Нормативного справочника по буровзрывным работам» [2] равным $0,46 \text{ кг/м}^3$; H – высота уступа, м. Как обычно k_1 принимается равным 0,9.

Определяется величина перебура ($L_{пер}$):

$$L_{пер} = 0,5 \cdot k \cdot W = 0,5 \cdot 0,46 \cdot 3,9 = 0,9 \text{ м} \quad (1.25)$$

где: k - расчетный удельный расход ВВ, также принимаемый из таблицы 26 «Нормативного справочника по буровзрывным работам» [2] равным $0,46 \text{ кг/м}^3$.

$L_{пер}$ принимается равным 1,0 м.

Определяется глубина скважины ($L_{скв}$):

$$L_{скв} = H_{уст} + L_{пер} = 12,5 + 1,0 = 13,5 \text{ м} \quad (1.26)$$

где $H_{уст}$ – высота уступа, м.

Определяется расстояние между скважинами в ряду "а" и расстояние между рядами зарядов "b":

$$a = k_2 \cdot W = (0,8 - 1,4) W = 0,95 \cdot 3,9 = 3,7 \text{ м} \quad (1.27)$$

$$b = k_2 \cdot W = (0,9 - 1,0) W = 0,95 \cdot 3,9 = 3,7 \text{ м} \quad (1.28)$$

Рассчитывается масса заряда в скважинах (по формуле 46 «Технических правил ведения взрывных работ на дневной поверхности» [1]):

$$Q = q \cdot W \cdot a \cdot H_{уст} = 0,46 \cdot 3,9 \cdot 3,7 \cdot 12,5 = 82,9 \text{ кг} \quad (1.29)$$

Принимается Q равным 83,0 кг. Полученный расчетный заряд делится в скважине на основной – 77 кг и дополнительный – 6 кг. Дополнительный заряд располагается на расстоянии 1,5 м от устья скважины и предназначен для качественного дробления верхней пачки пласта известняков уступа.

Если вычисленное по указанной выше формуле значение W получилось больше $0,8 H$, то W принимается в пределах $(0,6 - 0,8) H$, а масса заряда вычисляется по формуле:

$$Q = k \cdot W^3, \text{ кг.} \quad (1.30)$$

Определяется длина заряда ($L_{зар}$):

$$L_{зар} = Q / P, \text{ м} \quad (1.31)$$

Длина основного заряда:

$$L_{зар.осн} = Q_{осн} / P = 77 / 8,6 = 8,9 \text{ м} \quad (1.32)$$

Длина дополнительного заряда:

$$L_{зар.доп} = Q_{доп} / P = 6 / 8,6 = 0,7 \text{ м} \quad (1.33)$$

Рассчитывается длина забойки ($L_{заб}$):

$$L_{заб} = L_{скв} - L_{зар}, \text{ м} \quad (1.34)$$

Длина забойки (воздушного промежутка) между основным и дополнительным зарядом составит ($L_{пром}$):

$$L_{пром} = L_{скв} - L_{зар.осн} - L_{зар.доп} - L_{верхн.заб} = 13,5 - 8,9 - 0,7 - 1,5 = 2,4 \text{ м} \quad (1.35)$$

Определяется средний выход взорванной породы от одной скважины:

$$V = H_{уст} \cdot a \cdot \frac{W + (n - 1) \cdot b}{n} = 12,5 \cdot 3,7 \cdot \frac{3,9 + (2 - 1) \cdot 3,7}{2} = 175,8 \text{ м}^3 \quad (1.36)$$

где: V - выход породы от одной скважины, м^3 ; $H_{уст}$ - высота уступа, м; a - расстояние между зарядами в ряду, м; n - число рядов зарядов; b - расстояние между рядами скважин, м; W - расчетная величина сопротивления по подошве уступа (СПП) первого ряда зарядов, м.

Интервал замедления между рядами зарядов для улучшения степени дробления породы определяется по эмпирической формуле:

$$t = A \cdot W = 5 \cdot 3,9 = 19,5 \text{ мс} \quad (1.37)$$

где: A - коэффициент, зависящий от свойств взрывающей породы.

Интервал замедления принимается равным 20 мс.

Минимально допускаемое расстояние между ближайшими зарядами, взрываемыми с замедлением, определяется по формуле:

$$a_{min} = (5 + 0,3 \cdot t) \cdot d \cdot C = (5 + 0,3 \cdot 20) \cdot 0,11 \cdot 2,225 = 2,7 \text{ м} \quad (1.38)$$

где: C - коэффициент, учитывающий длину забойки; d – диаметр скважины, м.

Ширина развала породы после взрыва (B) определяется по формуле:

$$B = 1,6 \cdot H_{уст} + (n - 1) \cdot b = 1,6 \cdot 12,5 + (2 - 1) \cdot 3,7 = 23,7 \text{ м} \quad (1.39)$$

Высота развала взорванной массы ($H_{разв}$) составит:

$$H_{разв} = 0,6 \cdot H_{уст} = 0,6 \cdot 12,5 = 7,5 \text{ м.} \quad (1.40)$$

1.2.5 Выемочно-погрузочные работы

При отработке добычного уступа с применением буровзрывных работ применяются одноковшовый экскаватор ЭКГ-5А.

Выше указывалось, что выход негабарита при этих работах с параметрами БВР рассчитанных по формулам (1.24) ÷ (1.40) составляет порядка 10%. Бывают случаи с большими и меньшими значениями выхода негабарита, что обусловлено изменчивостью условий разрушаемых известняков. Как уже указывалось выше разделка негабарита требует дополнительных затрат средств и времени, а бурение шпуров в негабаритах связано, как известно с заболеваниями вибрационной болезни опасной для жизни буровиков. Поэтому весьма актуальным является применение параметров таких БВР, при которых исключалось бы формирование негабарита при ВР. Здесь также необходимо отметить, что и в этом случае эффективность последующих ГР после взрывного дробления известняков: разделка негабарита, экскавация и транспортировка горной массы, первичное дробление на обогатительной фабрике существенно зависят от степени дробления ГП [44, 52,

146, 178, 179, 201 и др.]. Поэтому повышение качества взрывного дробления пород позволит существенно повысить ТЭП ГР на известковых карьерах. Так что и в этом случае ставится практическая задача:

– разработать параметры БВР для взрывного дробления известняков обеспечивающих заметное снижение среднего размера кусков в развале и снижение выхода негабарита.

В приведенных соотношениях (1.24) ÷ (1.40) также нигде на прямую не учтены зависимости параметров БВР от прочностных свойств, разрушаемых ГП $\sigma_{сж}$, $\sigma_{рас}$, $\tau_{сдв}$ и др. и термодинамических параметров ПВВ. В приведенных формулах для расчета параметров ВР введены разного рода поправочные коэффициенты k , k_1 , k_2 , k_3 , A , C и др. в соответствии с категориями пород по СНиП, по крепости, по взрываемости, по трещиноватости и др. с учетом обобщения результатов ВР, выполненных на Мончаловском месторождении известняков и керамзитовых глин.

Используя приведенные соотношения, в принципе невозможно обеспечить заметное повышение степени взрывного дробления известняков и снижения выхода негабарита. Поскольку из всех физико-технических свойств известняков в рассматриваемых соотношениях используется только один параметр этих свойств. Однако оно существенно зависит от взаимного влияния взрывааемых зарядов на процесс разрушения ими породы.

1.3 Влияние степени дробления пород на технико-экономические показатели горных работ

Как известно, академик (акад.) Н.В. Мельников указывал: «Вопрос о рациональном использовании энергии ВВ с точки зрения достижения дробления ГП, т.е. получения кусков породы необходимой величины при минимальном расходе ВВ, весьма актуален и важен для горной промышленности. Степень изменения расхода ВВ на единицу породы в зависимости от крупности получаемых кусков, а также выявление распределения расхода энергии взрыва до сих пор, как с практической, так и с теоретической стороны недостаточно выявлены» [120]. Этим и

обусловлено большое количество работ, выполненных для установления существенных соотношений, определяющих степень дробления ГП характеризующихся средним размером куска в развале в зависимости от параметров ВР. Однако полученные результаты содержат большое количество поправочных коэффициентов вследствие чего полученные зависимости будут справедливы только для близких к установленным условиям, т.е. нет обобщенных соотношений, которые были бы приемлемы для разных типов ГР. А обусловлено это тем, что в указанных соотношениях практически не содержатся физико-технические свойства пород и термодинамические параметров зарядов. К последним принято относить:

$P_{ж}$ — давление, создаваемое в зарядной полости после детонации ВВ, равно:

$$P_{ж} = \lambda \cdot D^2 / (\Delta + 1), \quad (1.41)$$

где λ — плотность ПВВ, кг/м³;

D — скорость детонации ПВВ, м/с;

Δ — показатель изотропы продуктов детонации (ПД).

Известно, что D — пропорционально Q_{max} , где Q — потенциальная энергия зарядов ПВВ. Вместе с тем реальное выделение тепла и формирование $P_{ж}$ при конкретных условиях инициирования зарядов не поддается точной количественной оценки и поэтому принято $P_{ж}$ рассчитывать по формуле (1.41).

Таким образом, в применяемых методиках расчета параметров БВР практически используются только два параметра физико-технических свойств пород (плотность и крепость) и один параметр ПВВ (работоспособность).

Вместе с тем степень взрывного дробления ГП существенно влияет на экскавацию, транспортировку горной массы, вторичное дробление и на другие процессы ГР, следовательно, достижением заданной степени дробления горной массы в развале можно существенно повысить ТЭП ГР.

Аналогичные результаты влияния степени дробления ГП на выход негабарита и на ТЭП ГР зафиксированы и для других месторождений.

На наш взгляд — это влияние среднего размера куска в развале на стоимость последующих ГР, обусловлено в первую очередь тем, что параметры ВР в

используемых методики расчета определялись не в зависимости от физико-технических свойств пород, а от их различных категорий с введением целого ряда поправочных коэффициентов, а во-вторых при разработке рассматриваемых параметров БВР был применен эмпирический подход и даже не рассматривались модели процесса деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов ПВВ.

1.4 Постановка научной задачи

Из проведенного анализа следует, что эффективность ГР существенно зависит от степени взрывного дробления ГП, поэтому для достижения более эффективных ТЭП ГР необходимо установить закономерности взрывного дробления пород от параметров физико-технических свойств последних и термодинамических параметров, применяемых ПВВ, что позволит решить поставленную практическую задачу.

Для её решения должны быть установлены закономерности:

- формирования зон регулируемого и нерегулируемого дробления ГП при их взрывном дроблении;
- степень взрывного дробления ГП в развале в зависимости от термодинамических параметров ПВВ, физико-технических свойств пород и схем инициирования зарядов;
- выход негабарита в зависимости от степени разрушения ГП на взрываемом уступе и схем инициирования зарядов.

Для решения этих задач необходимо проанализировать известные модели взрывного дробления ГП на карьерах с учетом формирования зон регулируемого и не регулируемого дробления при взрыве каждого заряда. На основе этого анализа следует развить модель, наиболее реально описывающую процессы РГПВ зарядов ПВВ, что позволило бы установить искомые закономерности. Соответствующие исследования будут приведены в следующей главе.

Выводы по главе 1

1. При расчетах параметров БВР в настоящее время широко применяются соотношения используемые различные категории пород (по СНиП, по ЦБПНТ, по шкале проф. М.М. Протодьяконова, по данным В.К. Рубцова, по МКВ по ВД при АГН и др.), в которых используется, только одна характеристика пород – её крепость, хотя процессы разрушения ГП существенно зависят ещё от других прочностных свойств ГП (плотности, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, предел прочности на одноосное растяжение, предел прочности на одноосное сжатие, предел прочности пород на сдвиг и др.). Вследствие чего и не удастся установить параметры ВР обеспечивающие заданную степень их взрывного дробления.

2. Термодинамические параметры ПВВ мало учитываются в рассматриваемых методиках расчета, что также не позволяет установить зависимость параметров ВР от термодинамических параметров используемого ПВВ.

3. В рассматриваемых методиках расчета никак не учтено влияние интервалов замедления и взаимное влияние взрываемых зарядов ПВВ на уступе на процессы взрывного дробления пород.

4. Указанные недостатки применяемых методик расчета параметров ВР обусловлено в первую очередь тем, что эти методики не основаны на модели процесса РГПВ зарядов ПВВ.

Глава 2. АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВОМ ЗАРЯДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Как уже отмечалось выше, чтобы решить поставленную практическую задачу необходимо установить закономерности взрывного дробления пород от параметров физико-технических свойств этих пород и термодинамических параметров, применяемых ПВВ. А для установления этих закономерностей необходимо проанализировать известные модели взрывного дробления ГП на карьерах с учетом формирования в них зон регулируемого и не регулируемого дробления при взрыве каждого заряда.

При инициировании зарядов ПВВ, процессы деформирования и разрушения массива ГП происходят в результате воздействия на них газообразных ПД. В настоящее время установлены и основные термодинамические параметры ПД при взрыве удлиненных зарядов ПВВ и процессы детонации ПВВ, проанализировав которые возможно найти решения поставленных задач.

2.1 Общие энергетические оценки формирования разных зон разрушения

2.1.1 Формирование и развитие теорий и моделей процессов взрывного деформирования и разрушения горных пород

Впервые достаточно достоверный и качественный анализ процессов деформирования ГП взрывом зарядов ВВ и формирования взрывных сейсмических волн был выполнен с использованием точного решения в квадратурах, установленного Дж. Шарпом [206] – о динамическом деформировании линейно-упругой среды со сферической полостью и решения Г. Селберга [205] – о динамическом деформировании такой же среды с бесконечной круговой цилиндрической полостью.

В МГГУ, ВНИМИ, ИФЗ, ИГД им. А.А. Скочинского и др. организациях в 60 – 70 гг. XX века был проведен большой цикл исследований по оценке влияния скорости деформации ГП на их механические свойства.

Проф. В.Н. Родионовым с сотрудниками ИФЗ была разработана совершенная на то время поэтапная, зонная модель крупномасштабного камуфлетного взрыва сосредоточенного заряда.

В ИПКОНе РАН в последнее время выполнен большой комплекс аналитических и практических исследований по широкому кругу вопросов, связанных с рациональным применением взрыва в промышленности, разработке СИ и новых ВВ, параметров БВР при крупномасштабной отбойке ГП и т.д.

В ИХФ РАН выполнялись фундаментальные исследования по установлению термодинамических параметров и формирования детонации в конденсированных ПВВ, которые установили величину пикового давления в детонационных волнах, их длину и т.д.

Вместе с тем практика взрывного дела (ВД) непрерывно ставит перед исследователями все новые задачи по совершенствованию процессов взрывного деформирования и разрушения ГП для новых условий с применением новых типов ВВ и СИ. Этим обстоятельством и обусловлено проведение с 1988 г. ИПКОНОм РАН (один раз в два года) международных конференций под общим названием «Физические проблемы разрушения горных пород» под руководством акад. К.Н. Трубецкого и проф. С.Д. Викторова, а также целого ряда международных конференций, как в нашей стране, так и за рубежом, посвященных проблемам взрывного дела [23, 27, 71, 78, 204 и др.]. Кроме того, результаты исследований процессов взрывного разрушения ГП обсуждаются на научно-практических конференциях «Неделя горняка», проводимых в МГГУ в январе каждого года [46, 80 и др.].

Анализ на этих конференциях представленных докладов и работ по деформированию и разрушению ГП взрывами зарядов ВВ показал, что многие закономерности и явления для этих процессов установлены. Однако ни в одной работе (кроме авторских) не установлены главные для практики ВД общие соотношения, связываю-

щие параметры зарядов ВВ и физико-технические свойства ГП с размерами их зон разрушения при взрыве зарядов.

Именно это обстоятельство 2001 г. заставило Г.М. Крюкова и Ю.В. Глазкова [80] начать разрабатывать новую модель деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов ПВВ путем обобщения уже выявленных закономерностей для установления необходимых для практики зависимостей размеров зон разрушения пород от их свойств и параметров зарядов ПВВ. В 2003 г. модель была разработана и ей было присвоено название феноменологическая квазистатическо-волновая модель (ФКСВ) деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных ВВ [80].

Установлено, что объемы разрушения ГП и амплитуды взрывных волн, формирующихся при взрывах в них зарядов ПВВ, пропорциональны их массе. На основе чего ещё в прошлом веке был сформулирован основной подход расчета масс зарядов ПВВ в виде:

$$M = q_p \cdot V, \quad (2.1)$$

где M - общая масса зарядов ПВВ, кг; q_p - расчетный удельный расход ПВВ, кг/м³; V - объем разрушаемых ГП на уступе, подлежащий взрывному дроблению, м³.

Расчет (2.1) применялся на протяжении всего XX века, в том числе во многих исследованиях таких известных ученых как: акад. Мельников Н.В. [120], Покровский Г.И. [137, 138] и других ученых и специалистов [34, 35, 163, 164, 171, 172 и др.]. Также в этих исследованиях было установлено, что с удалением от взорванного заряда в породе формируются три разных зоны (ближняя, средняя и дальняя), в которых имеют место разные зависимости параметров взрывных волн от r .

I. Ближняя зона – зона около взорванного заряда ПВВ, в которой регистрируются волна сжатия, распространяющаяся со скоростью C_1 и волна сдвига, распространяющаяся со скоростью C_2 .

II. Средняя зона – зона, в которой регистрируется ещё и поверхностная волна, скорость которой равна $C_3 = 0,4 \times C_1$.

III. Дальняя зона – зона, в которой регистрируются только поверхностная волна, которая в свою очередь, производят наибольший разрушительный эффект.

Эти исследования также велись многими учеными на протяжении долгого времени: Родионовым В.Н., Рубцовым В.К., Миндели Э.О., Мельниковым Н.В., Покровским Г.И., Друкованным М.Ф., Демидюком Г.П., Дроговейко И.З., Дубновым Л.В., Дамбаевым Н.Л., Ефремовым Э.И., Беляевым А.Ф., Балбачан И.П., Баумом Ф.А., Боровиковым В.А., Власовым О.Е., Садовским М.А., Станюковичем К.П., Саламахиным Т.М., Лангерфорсом У.И., Ханукаевым А.Н. и многими др.

Акад. М.А. Садовский [163-165] опираясь на энергетический подход (2.1) рассчитывал массовую скорость частиц пород в сферической волне, распространяющейся по массиву от взорванного заряда ВВ по соотношению:

$$V_M = K_c \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^\alpha, \quad (2.2)$$

где m - масса заряда, кг; r - расстояние от центра заряда до рассматриваемой точки массива, м. Значения коэффициентов K_c и α зависят от типа пород, строения массива и условий взрывания, и имеют значения $K_c = 100 \div 1000$, $\alpha = 1,2 \div 3$.

В средней и дальней зонах – длительности волны было предложено соотношение:

$$T = K_{tS} \lg \bar{R}, \quad (2.3)$$

где $\bar{R} = r / \sqrt[3]{m}$; K_{tS} - эмпирический коэффициент, имеющий значения от 0,01 ÷ 0,03 (для гранитов) до 0,06 ÷ 0,09 (для плотного песка).

Анализ методик расчета параметров БВР показал, что при ведении ВР соотношения (2.2) и (2.3) применялись, для существенно различающихся по свойствам пород от мягких (пески, глины) до крепких (граниты, известняки и т.д.) [2]. Причём, приняв соотношения (2.2) и (2.3) за основу для конкретных горно-геологических и горно-технических условий, по опытным взрывам определяются значения коэффициентов K_c , α и K_{tS} [20].

Имеет место и большое количество работ, в которых предполагается, что в породе после взрыва около заряда формируются квазистатические распределения

напряжений, к примеру:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = P_{ж} \left(\frac{a_0}{r} \right)^3; \quad \sigma_{rr} = -P_{ж} \left(\frac{a_0}{r} \right)^3; \quad \sigma_{\alpha\alpha} = \sigma_{\beta\beta} = -\sigma_{rr}. \quad (2.4)$$

где $\sigma_{\alpha\alpha}$ - полярное растягивающее напряжение, Па; $\sigma_{\beta\beta}$ - азимутальные напряжения, Па; σ_{zz} - нормальное напряжение, направленное вдоль оси заряда, $\sigma_{zz}=0$; σ_{rr} - радиальное сжимающее напряжение, Па; $P_{ж}$ - давление ПД на фронте детонационной волны в заряде (точка Жуге); a_0 - радиус зарядной полости, м; r - расстояние от оси заряда до рассматриваемой точки массива, м.

А для взрыва бесконечного удлиненного заряда:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = P_{ж} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2; \quad \sigma_{rr} = -P_{ж} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2; \quad \sigma_{zz} = P_{ж} \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_{rr}. \quad (2.5)$$

Вместе с тем в начале XXI века в работе [75] было доказано, о том, что соотношения (2.1) и (2.4) эквивалентны и однозначно соответствуют друг другу. Приведем краткое изложение этих доказательств.

Из [75] будем считать, что тождественно выполняется соотношение (2.1), поскольку многократно проверено во всем мире при взрывном дроблении ГП:

$$M_{зр} \equiv q \cdot V, \quad (2.6)$$

Рассмотрим мгновенный камуфлетный взрыв бесконечного цилиндрического заряда диаметром $d_{зр} = a_0$ в бесконечной среде. Масса участка этого заряда длиной $l_{зр}$ равна:

$$M_{зр} = \pi a_0^2 \Delta l_{зр}, \quad \text{кг} \quad (2.7)$$

Зафиксируем q в (2.6) и будем считать, что при постоянном давлении в зарядной полости, равном $P_{ж}$, НДС в породе, определяющее процессы её разрушения, описывается соотношениями:

$$\sigma_{rr} = -P_{ж} \left(\frac{a_0}{r} \right)^n; \quad \sigma_{\alpha\alpha} = \lambda \sigma_{rr}; \quad \sigma_{zz} = \mu (\sigma_{rr} + \sigma_{\alpha\alpha}) \quad (2.8)$$

где n и λ пока неизвестные величины. Рассмотрим зону радиального трещинообразования (регулируемого дробления породы взрывом), внешняя граница которой рав-

на $r = b_0$ и на которой $\sigma_{aa} = \sigma_{pac}$. В соответствии с (2.8) находим, что этот радиус равен:

$$b_0 = a_0 \left(\frac{-\lambda P_{ж}}{\sigma_{pac}} \right)^{1/n}, \text{ м} \quad (2.9)$$

Поскольку b_0 является величиной действительной и положительной, то из (2.9) следует, что $\lambda < 0$. Объем зоны разрушения около этого участка заряда будет равен:

$$V_{p\partial} = \pi b_0^2 l_{зр} = \pi a_0^2 l_{зр} \left(\frac{-\lambda P_{ж}}{\sigma_{pac}} \right)^{2/n}, \text{ м}^3 \quad (2.10)$$

Давление $P_{ж}$ в ПД связано с Δ -плотностью заряжения зарядной полости, соотношением:

$$P_{ж} = \Delta \frac{D^2}{\gamma + 1}, \text{ или } \Delta = \frac{\gamma + 1}{D^2} P_{ж}. \quad (2.11)$$

Подставляя в (2.6) соотношения (2.10) и (2.11), получим:

$$\pi a_0^2 l_{зр} \frac{\gamma + 1}{D^2} P_{ж} = \pi a_0^2 l_{зр} q \left(\frac{-\lambda P_{ж}}{\sigma_{pac}} \right)^{2/n}, \text{ или } P_{ж} = \frac{q D^2}{\gamma + 1} \left(\frac{-\lambda P_{ж}}{\sigma_{pac}} \right)^{2/n}. \quad (2.12)$$

Меняя тип ПВВ и плотность заряжения Δ , можно добиться того, чтобы выполнялось условие:

$$\frac{q D^2}{\gamma + 1} = \text{const} \quad (2.13)$$

В этом случае тождество (2.12) будет выполняться только при $n=2$ и соответствует решению Ляме с распределением напряжений (2.5), при $\lambda = -1$. Таким образом, по (2.6) процесс радиального трещинообразования (регулируемого дробления) полностью определяется статическими распределениями напряжений около зарядной полости.

Рассмотрим зону мелкодисперсного дробления породы, внешний радиус которой равен b_* . Примем опять, что при постоянном давлении в зарядной полости, равном $P_{ж}$, НДС в породе около зарядной полости описывается соотношениями (2.8) здесь n и λ опять пока неизвестные величины. При $r = b_*$ (на внешней границе

мелкодисперсного дробления) радиальное сжимающее напряжение равно $\sigma_{rr} = -\sigma_{m0}$. В соответствии с этими значениями параметров из (2.8) находим:

$$b_* = a_0 \left(\frac{P_{ж}}{\sigma_{m0}} \right)^{1/n}, \text{ М} \quad (2.14)$$

так что объем мелкодисперсного дробления около рассматриваемого участка заряда равен:

$$V_{m0} = \pi b_*^2 l_{зп} = \pi a_0^2 l_{зп} \left(\frac{P_{ж}}{\sigma_{m0}} \right)^{2/n}, \text{ М}^3 \quad (2.15)$$

Учитывая (2.7), (2.11) и (2.15), из (2.6) находим:

$$P_{ж} = \frac{qD^2}{\gamma + 1} \left(\frac{P_{ж}}{\sigma_{pac}} \right)^{2/n}. \quad (2.16)$$

И в этом случае, меняя тип ПВВ и плотность зарядания Δ , можно добиться того, чтобы выполнялось (2.13). Следовательно, тождество (2.16) может в этом случае иметь место только при $n=2$, соответствующее решению Ляме (2.5) – статическому распределению напряжений около зарядной полости. Значит, и процесс мелкодисперсного дробления породы полностью определяется статическими распределениями напряжений около зарядной полости.

Оценки из (2.6) получаются и при рассмотрении процесса разрушения (деинтеграции) клиновидных секторов при достижении радиальными сжимающими напряжениями значений $\sigma_{rr} = -2\tau_{c0в}$.

Используя соотношения (2.6) при аналогичных оценках закономерности разрушения ГП при одиночных камуфлетных взрывах сосредоточенных зарядов ПВВ установлено, что и в этом случае все процессы разрушения пород полностью определяются статическими распределениями напряжений (2.4) около взорванного заряда ПВВ. При этом зона радиального трещинообразования (регулируемого дробления) в ГП происходит в области, где $\sigma_{\alpha\alpha} \geq \sigma_{pac}$ и $\sigma_{\beta\beta} \geq \sigma_{pac}$, зона разрушения конических секторов – в области $|\sigma_{rr}| \geq 2\tau_{c0в}$, а зона мелкодисперсного дробления – в области $|\sigma_{rr}| \geq \sigma_{m0}$.

Итак, оценки, выполненные с использованием соотношения (2.6), позволяют утверждать, что все процессы разрушения ГП при одиночных взрывах зарядов ПВВ полностью определяются статическими распределениями напряжений, формирующимися в породе около взорванных зарядов.

Поскольку для пределов прочности породы выполняются соотношения:

$$\sigma_{рас} \ll \sigma_{сж} ; \sigma_{рас} \ll \tau_{сдв}, \quad (2.17)$$

А статические полярные растягивающие напряжения $\sigma_{\alpha\alpha}$ имеют один порядок с σ_{rr} - радиальными сжимающими напряжениями (см. (2.4) и (2.5)), то первым процессом её разрушения будет формирование в ней радиальных трещин, исходящих от зарядной полости, с образованием клиновидных секторов. Известно, что при развитии трещин напряжения на её вновь образованных свободных поверхностях очень быстро уменьшаются до нуля путем распространения в нагруженной среде поверхностных волн и волн сдвига (в данном случае – в клиновидных секторах). Радиальные же напряжения σ_{rr} в клиновидных секторах остаются практически теми же самыми, какими они были в породе до развития радиальных трещин. Поэтому НДС в этих секторах становится близким к неравновесному одноосному сжатию $\sigma_{rr} = -P(a/r)^2$; $\sigma_{\alpha\alpha} = 0$; $\sigma_{zz} = 0$. В точках клиновидных секторов, в которых $|\sigma_{rr}| \geq \sigma_{мд}$, будет происходить интенсивное мелкодисперсное дробление породы, а в точках, в которых $\sigma_{мд} \geq |\sigma_{rr}| \geq 2\tau_{сдв}$ будут развиваться трещины сдвига, направленные не параллельно направлению σ_{rr} , приводящие к разрушению этих секторов на отдельные куски, т.е. к их дезинтеграции.

По радиальным трещинам и трещинам сдвига будут распространяться ПД из зарядной полости, что приводит к дополнительному снижению давления в этой полости.

В соответствии со сформулированными выше положениями и статическими распределениями напряжений (2.4) и (2.5) в породе внешние радиусы b_* – зоны мелкодисперсного дробления, b_τ – зоны развития трещин сдвига в клиновидных секторах (зоны дезинтеграции этих секторов) и b_0 – зоны радиального трещинообразо-

вания определяются соотношениями, приведенными ниже. При этом ширина зоны регулируемого дробления породы принимается равной $W_p = 2b_0$.

При взрыве сосредоточенного заряда:

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{ж} / \sigma_{мд}}; \quad b_0 = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{ж} / 2\sigma_{рас}}; \quad b_\tau = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{ж} / 2\tau_{сдв}}. \quad (2.18)$$

где $\sigma_{мд} = 13[1 + 0,079(f - 15) + 0,0019(f - 15)^2] \cdot 10^8$, Па.

При взрыве бесконечно длинного заряда:

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt{P_{ж} / \sigma_{мд}}; \quad b_0 = a_0 \cdot \sqrt{P_{ж} / \sigma_{рас}}; \quad b_\tau = a_0 \cdot \sqrt{P_{ж} / 2\tau_{сдв}}. \quad (2.19)$$

Распределение (2.4) и (2.5) соответствует деформированию и разрушению породы при постоянном давлении $P = P_{ж}$ в зарядных полостях. С учетом же расширения зарядной полости под действием ПД эти соотношения преобразуются [86] к виду, приведенному ниже.

При взрыве сосредоточенного заряда:

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{ж} / k_2 \sigma_{мд}}; \quad b_0 = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{ж} / 2k_2 \sigma_{рас}}; \quad b_\tau = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{ж} / 2k_2 \tau_{сдв}}. \quad (2.20)$$

где $k_2 = 1 + 3\gamma P_{ж} (1 + \mu) / E$.

При взрыве бесконечно длинного заряда:

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt{P_{ж} / k_3 \sigma_{мд}}; \quad b_0 = a_0 \cdot \sqrt{P_{ж} / k_3 \sigma_{рас}}; \quad b_\tau = a_0 \cdot \sqrt{P_{ж} / 2k_3 \tau_{сдв}}. \quad (2.21)$$

где $k_3 = 1 + 2\gamma P_{ж} (1 + \mu) / E$.

Рассмотрим взрыв в породе сосредоточенного заряда массой $M_{зр}^{(c)} = \frac{4}{3} \pi \Delta a_0^3$ и бесконечно длинного цилиндрического заряда диаметром $d_{зр} = 2a_0$. Выбирается участок последнего длиной $l_{зр} = \frac{4}{3} a_0$. При взрыве обоих зарядов в одной и той же породе объемы мелкодисперсного дробления будут равны:

$$V_{мд}^{(c)} = \frac{4}{3} \pi b_*^3 = M_{зр}^{(c)} \frac{P_{ж}}{k_2 \Delta \sigma_{рас}}, \text{ М}^3;$$

$$V_{мд}^{(d)} = \pi b_*^2 l_{зр} = M_{зр}^{(c)} \frac{P_{ж}}{k_2 \Delta \sigma_{рас}}, \text{ М}^3, \quad (2.22)$$

где $V_{мд}^{(c)}$ и $V_{мд}^{(d)}$ - объемы мелкодисперсного дробления породы при взрыве сосредоточенного и участка длиной $l_{зр}$ бесконечно длинного зарядов соответственно. Примем, что оба заряда состоят из одного и того же ПВВ с одной и той же плотностью заряжения Δ . При принятых предположениях отношение указанных объемов мелкодисперсного дробления породы будет равно:

$$V_{мд}^{(c)} / V_{мд}^{(d)} = k_3 / k_2. \quad (2.23)$$

Так, к примеру при добыче щебня: $k_3 = 0,82k_2$. Это означает, что объем мелкодисперсного дробления конкретной породы при взрыве в ней сосредоточенного заряда будет составлять лишь 82% от соответствующего объема при взрыве участка бесконечно длинного заряда того же ПВВ и такой же массой. Этот факт свидетельствует о том, что нельзя рассчитывать на существенное снижение выхода «отсева» к примеру, при добыче щебня на карьерах путем изменения формы зарядов, поскольку эти объемы для двух крайних случаях – взрыве сосредоточенного и бесконечно длинного зарядов, отличаются всего на 18%. Именно поэтому многочисленные и многолетние попытки добиться заметного снижения выхода отсева путем изменения конструкции зарядов при фиксированном q - удельном расходе ПВВ и выполненные в промышленных условиях при добыче щебня, не дали положительных результатов [75].

Теперь рассчитаем объемы радиального трещинообразования (регулируемого дробления) при взрыве обоих рассматриваемых выше зарядов [75]. По (2.20) и (2.21) получим:

$$\begin{aligned} V_{рd}^{(c)} &= \frac{4}{3} \pi b_0^3 = M_{зр}^{(c)} \frac{P_{ж}}{2k_2 \Delta \sigma_{рас}}, \text{ м}^3; \\ V_{рd}^{(d)} &= \pi b_0^2 l_{зр} = M_{зр}^{(c)} \frac{P_{ж}}{k_3 \Delta \sigma_{рас}}, \text{ м}^3, \end{aligned} \quad (2.24)$$

где $V_{рd}^{(c)}$ и $V_{рd}^{(d)}$ - объемы радиального трещинообразования породы при взрыве сосредоточенного и участка длиной $l_{зр}$ бесконечно длинного зарядов соответственно.

При принятых предположениях отношение этих объемов равно:

$$V_{\rho d}^{(c)} / V_{\rho d}^{(o)} = k_3 / 2k_2 = 0,41. \quad (2.25)$$

Это означает, что объем породы регулируемого дробления при взрыве сосредоточенного заряда ПВВ фиксированной массы не превышает 41% от объема регулируемого дробления, которое формируется при взрыве в породе взрывом участка длиной $l_{зр}$ бесконечно длинного заряда. То есть эффективность дробления ГП взрывом удлинённых зарядов ПВВ приблизительно в 2,5 раза больше, чем при взрыве сосредоточенного заряда той же массы.

Таким образом, изложенные оценки в диссертации и в упомянутых выше работах [20, 80, 86 и др.] позволили не только сформулировать теоретические доказательства достоверности соотношения (2.6) – основного подхода расчета $M_{зр}$ - массы зарядов ПВВ, справедливого при любой степени дробления пород, но и доказать существенно большую эффективность применения удлинённых зарядов ПВВ по сравнению с сосредоточенными при взрывном дроблении ГП [75].

2.2 Волновые теории разрушения горных пород взрывом

При камуфлетном взрыве сосредоточенного заряда ПВВ в массиве ГП все параметры НДС породы зависят только от двух переменных r и t , где r - расстояние от центра заряда до рассматриваемой точки породы, а t - время, за которое волна проходит это расстояние. Но тем не менее, ее общее решение в квадратурах связано с рядом математических задач. Так Дж. Шарпом [206] при решении, был предложен ряд упрощений (и в этом подразделе, аналогично подразделу 2.1 настоящей диссертации, аналитический подход теории проводится в соответствии с диссертацией [20], выполненной под руководством проф., д.т.н. Г.М. Крюкова):

I. ГП принимается однородной, непрерывной, бесконечной, изотропной и линейно-упругой средой, характеризуемой плотностью – ρ_{np} , модулем упругости – E и коэффициентом Пуассона – μ .

II. При детонации ПВВ зарядной полостью радиусом – a_0 , расположенной в породе и заполненной с плотностью – $\rho_{ВВ}$, происходит мгновенное превращение ПВВ в газообразное состояние ПД.

III. Давление в зарядной полости мгновенно возрастает до P_0 и остается постоянным бесконечно долго.

Акад. М.А. Садовский установил соотношение для уменьшения амплитуды волны с удалением от заряда [163]:

$$\sigma_{rr} = -k_2 P_0 \left(\frac{a}{r} \right), \quad (2.26)$$

где k_2 - коэффициент, зависящий от строения ГП.

Решения Дж. Шарпа [206]: длительность взрывной волны равна бесконечности при формировании около зарядной полости статистического поля напряжений.

Так во всех решениях линейной механики сплошной среды применяются упрощения для значений напряжений, деформаций, перемещений и т.п., и т.д., имеющие существенные отличия с реальным процессом деформирования упругой среды.

Физической сущностью формирования взрывной волны и процессов разрушения ею ГП характеризуют исследования крупномасштабного камуфлетного взрыва сосредоточенного заряда. В институте ИФЗ [3, 156, 157, 163-165 и др.] были выполнены такие исследования, основанные на развивающиеся в то время модели М.А. Садовского. Основные результаты этих исследований процесса будут приведены ниже.

2.3 Феноменологическая квазистатическо-волновая модель разрушения горных пород и модель проф. В.Н. Родионова

Проф. В.Н. Родионовым с сотрудниками ИФЗ [156] была разработана поэтапная, зонная модель крупномасштабного камуфлетного взрыва сосредоточенного заряда [156].

Адаптация в [74] модели проф. В.Н. Родионова на случай взрыва в ГП зарядов ПВВ не увенчалась успехом, поскольку физика этого процесса существенно отличается от физики процессов деформирования и разрушения ГП при подземных взрывах ядерных зарядов. Поэтому в разных организациях продолжились исследования по развитию теорий дробления ГП взрывом зарядов ПВВ применительно к горному делу (ГД) и строительству. Наибольшие успехи в этом направлении были достигнуты в МГГУ, логически развивающие модель проф. В.Н. Родионова для указанных выше ВР в виде разработки новой ФКСВ теории деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов ПВВ. Основные положения этой теории после многолетних исследований были сформулированы лишь в 2003 г. [78, 80 и др.]. Коротко изложим суть этой модели.

Под действием детонационной волны, распространяющейся по ПВВ, в зарядной полости формируется особая волна разрежения, максимальное давление в которой достигает $(4 \div 5) \cdot 10^9$ Па. Это давление генерирует в окружающей породе взрывную волну, массовые скорости частиц в которой существенно меньше C_1 - скорости продольных волн в породе. Значит, по породе от зарядной полости распространяется упругая волна малой амплитуды, формирующая "упругий предвестник".

Под действием взрывной волны в породе происходят радиальные перемещения частиц последней, направленные от оси удлиненного заряда и формирующие, в свою очередь, квазистатическое поле напряжений около зарядной полости в виде:

$$\sigma_{rr} = -P_{\text{ж}} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2 \quad \text{и} \quad \sigma_{\alpha\alpha} = P_{\text{ж}} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2, \quad (2.27)$$

где $P_{\text{ж}}$ - давление ПД в точке Жуге, Па; a_0 - радиус зарядной полости, м; r - радиус рассматриваемой точки породы относительно оси заряда, м; σ_{rr} - радиальное напряжение, Па; $\sigma_{\alpha\alpha}$ - полярное напряжение, Па.

Причем, для $P_{\text{ж}}$ имеет место соотношение (2.11):

$$P_{\text{ж}} = \frac{\Delta D^2}{\gamma + 1}, \quad (2.28)$$

где Δ - плотность заряжения скважины, кг/м^3 ; D - скорость детонации ПВВ, м/с ; γ - показатель изоэнтропы ПД в зарядной полости.

Выполненные оценки в модели ФКСВ показали, что при взрывах зарядов Граммонитов 79/21 с плотностью заряжения $\Delta = 1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ в скважинах диаметром $d_{скв} = 0,25 \text{ м}$ формирование в граните поля квазистатических напряжений (2.27) происходит не позже чем через 100 мкс после прохода данного сечения детонационной волной, т.е. очень быстро. Также очень быстро с запаздыванием всего 10-20 мкс формируются и разные процессы разрушения пород, сначала радиальные трещины – при достижении полярными напряжениями значений $\sigma_{\alpha\alpha} = \sigma_{рас}$, затем дробление клиновидных секторов на куски – при достижении радиальными сжимающими напряжениями значений $\sigma_{\gamma\gamma} = -2\tau_{сдв}$, и, наконец, интенсивное мелкодисперсное дробление пород – при достижении радиальными сжимающими напряжениями критических значений $\sigma_{\gamma\gamma} = -\sigma_{мд}$, причем для указанных критических значений имеют место соотношения:

$$\sigma_{рас} \ll 2\tau_{сдв} \ll \sigma_{мд}. \quad (2.29)$$

Таким образом, по модели ФКСВ, также, как и по модели проф. В.Н. Родионова, считается, что сначала происходят процессы деформирования породы взрывной волной, а затем после формирования квазистатического поля напряжений около зарядной полости – возникают разные процессы разрушения породы.

Внешние размеры соответствующих зон разрушения определяются из (2.27) и (2.28), т.е. по ФКСВ теории.

Существенным различием между ФКСВ модели и другими теориями заключается в разделении на три зоны областей взрывного воздействия: интенсивного мелкодисперсного дробления, радиального трещинообразования и упругого деформирования породы. Установлено, что в каждой зоне действия ГП описывается различными системами уравнений с учетом постепенного изменения давления ПД в зарядной полости и ее расширения с течением времени.

По ФКСВ модели порода также принимается однородной, непрерывной, изотропной и линейно-упругой средой. Начальный радиус взрывной полости равен a_0 .

Известно, что в породе после инициирования заряда образуются ПД [99, 189], имеющие скорость – V_0 и давление – P_0 , полная энергия – E_0 состоит из кинетической и потенциальной энергии упругого сжатия, так 1-ый этап ФКСВ модели: при давлении в зарядной полости $P_0 > 0,1 E$, где E - модуль Юнга породы, возможна сублимация породы.

2-ой этап: При давлении $0,1 E > P_0 \geq \sigma_*$, где σ_* - предел прочности пород на раздавливание, по породе распространяется ударная волна большой амплитуды, являющаяся фронтом мелкодисперсного дробления породы.

3-ий этап: Безволновое, динамическое нагружение породы.

На 3-ем этапе формируется три зоны: интенсивного мелкодисперсного дробления породы с внешним радиусом – b_* , радиального трещинообразования с внешним радиусом – b_0 и упругого деформирования породы при $r > b_0$.

Важным результатом ФКСВ теории является установление уравнений для радиуса a - расширяющейся полости с ПД при разных начальных и граничных условиях на каждом этапе, решение этих уравнений в квадратурах, и установить закономерности изменения напряжений в этих зонах.

Таким образом в ФКСВ модели впервые дано математическое описание процессов деформирования породы взрывной волной, формирование в породе квазистатических полей напряжений и развитие разных видов разрушения породы при достижении напряжениями критических значений $\sigma_{сж}$, $\sigma_{рас}$, $\tau_{сдв}$. А также сформулированы начальные и граничные условия для уравнений радиуса полости a_0 . То есть впервые дано квазистатическо-волновое описание процессов деформирования породы взрывной волной с использованием феноменологических критериев σ_* , $\sigma_{рас}$, $\tau_{сдв}$ для определения радиусов соответствующих зон разрушения.

Так за основу была принята ФКСВ модель процессов деформирования и разрушения ГП при взрыве в ней *удлиненного* заряда ПВВ, представленная на рисунке 2.1 [80].

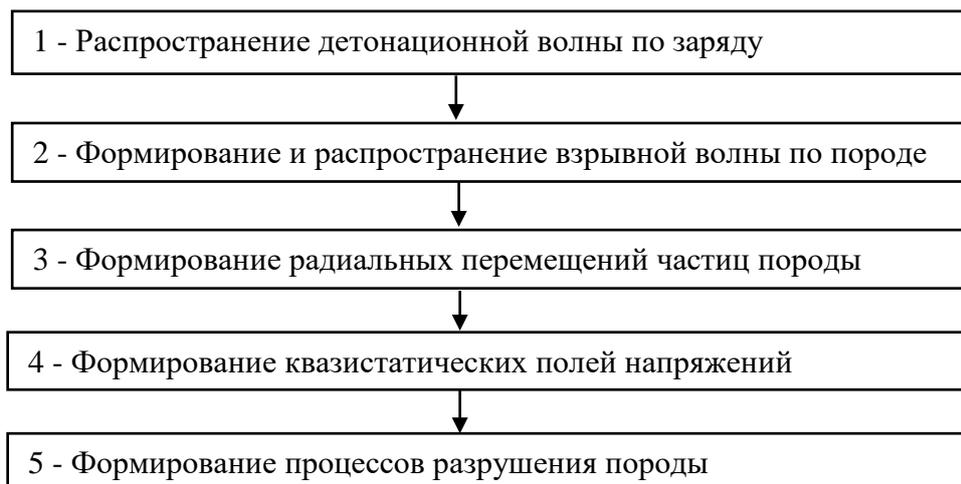


Рисунок 2.1 – ФКСВ модель формирования НДС в породе при взрыве заряда ПВВ.

Выводы по главе 2

1. Проанализированы существующие теории и модели дробления ГП взрывом удлиненных зарядов ПВВ, включая и установление закономерностей формирования гранулометрического состава в раздробленной горной массе с удалением от зарядной полости.

2. Изучена и принята теоретическая модель процессов деформирования и разрушения ГП при взрыве в ней удлиненного заряда ПВВ, описывающая процессы деформирования породы взрывной волной, формирования НДС в породе при взрыве заряда ПВВ для определения размеров зон разрушения и позволяющая развить теорию разрушения горных пород взрывом зарядов ПВВ.

3. Решение устанавливает зависимости размеров разных зон разрушения пород и формирование в них гранулометрического состава раздробленных кусков пород от физико-технических свойств пород и параметров зарядов ПВВ.

Глава 3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОДЫ В ЗОНЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ДРОБЛЕНИЯ

3.1 Элементы теории разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ

Любой процесс разрушения взрывного дробления ГП – это процесс развития трещин, которые при напряжении σ определяется в твердых телах наличием в них всякого рода дефектов и в первую очередь – микротрещин. Принимается, что размер кусков породы, формирующихся в некоторой области на заданном расстоянии от взорванного заряда, обратно пропорционален количеству трещин в этой области. Поэтому

$$l_{\text{кск}} \sim N_{\text{тр}}^{-1}, \quad (3.1)$$

где $l_{\text{кск}}$ - размер кусков породы, формирующихся при действии на неё напряжения σ , м; $N_{\text{тр}}$ - число трещин в рассматриваемой области.

Развитие каждой трещины происходит от некоторого дефекта, поэтому принимается:

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{дф}}, \quad (3.2)$$

где $N_{\text{дф}}$ - количество реализованных дефектов (микротрещин) в породе заданного уровня.

Известно, что $N_{\text{дф}}$ уменьшается с увеличением их длины ($l_{\text{дф}}$), поэтому:

$$N_{\text{дф}} \sim l_{\text{дф}}^{-\alpha}, \quad \Rightarrow \quad l_{\text{кск}} \sim l_{\text{дф}}^{\alpha}, \quad (3.3)$$

где α - характерный для каждой породы параметр, определяющий распределение в ней дефектов по их длине.

Из теории трещин известно, что

$$\sigma_{\text{кр}} = k_c / (l_{\text{дф}})^{0.5}, \text{ Па}, \quad (3.4)$$

где $\sigma_{кр}$ - критическое напряжение в небольшой локальной области породы, в соответствии с принципом «микроскопа», Па; k_c - коэффициент концентрации напряжений, равный $(2E\gamma/\pi(1-\mu^2))^{0.5}$, здесь E - модуль Юнга, Па; γ - удельная поверхностная энергия, Дж/м²; μ - коэффициент Пуассона породы.

С учетом изложенного получаем:

$$l_{кск} \sim \sigma^{-2\alpha}. \quad (3.5)$$

Установлено, что квазистатические напряжения, определяющие процессы разрушения ГП в зоне регулируемого дробления, убывают с удалением от удлиненного заряда по законам [80]:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = P_{жс} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2; \quad \sigma_{rr} = -P_{жс} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2; \quad (3.6)$$

где $\sigma_{\alpha\alpha}$ - полярное растягивающее напряжение, Па; σ_{rr} - радиальное сжимающее напряжение, Па.

Объединяя (3.5) и (3.6), устанавливается закон изменения размеров кусков породы с удалением от оси заряда в зоне регулируемого дробления:

$$l_{кск} = l_{оп} \cdot \left(\frac{r}{r_{оп}} \right)^{4\alpha}, \quad (3.7)$$

где $l_{кск}$ - максимальный размер кусков в разрушенной породе на расстоянии r от оси заряда, м; $l_{оп}$ - максимальный размер кусков в опорной точке, находившейся на расстоянии $r_{оп}$ от оси заряда, м.

Интегрируя (3.7) по области регулируемого дробления, устанавливается средний размер кусков породы в области $r \leq r_{др}$ в виде:

$$d_{ср} = \frac{l_{оп}}{2\alpha + 1} \left(\frac{r_{др}}{r_{оп}} \right)^{4\alpha}; \quad d_{ср} = l_{кск}^{max} / (2\alpha + 1), \quad (3.8)$$

где $l_{кск}^{max}$ - максимальный размер кусков во всей зоне регулируемого дробления породы $r \leq r_{др}$.

При этом необходимо учесть, что при взрывном дроблении пород наблюдается три разных зоны их разрушения. Внешний радиус зоны мелкодисперсного дробления равен:

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt{P_{жс} / \sigma_{мд}}, \text{ м}, \quad (3.9)$$

где $\sigma_{мд}$ - предел прочности породы, соответствующий её интенсивному мелкодисперсному дроблению.

Для пород, разрушенных в лабораторных условиях, $\sigma_{мд}$ равно:

$$\sigma_{мд} = 10 \cdot \sigma_{сжс}. \quad (3.10)$$

Радиус устойчивого формирования трещин сдвига, разрушающих клиновидные сектора, равен:

$$b_\tau = a_0 \cdot \sqrt{P_{жс} / 2\tau_{сдв}}, \text{ м}, \quad (3.11)$$

где $\tau_{сдв}$ - предел прочности пород на сдвиг, Па.

Аналогичные соотношения при взрыве сосредоточенного заряда имеют вид:

$$\sigma_{rr} = -P_{жс} \left(\frac{a_0}{r} \right)^3; \quad \sigma_{\alpha\alpha} = \sigma_{\beta\beta} = -0,5\sigma_{rr}; \quad (3.12)$$

$$l_{кск} = l_{оп} \cdot \left(\frac{r}{r_{оп}} \right)^{6\alpha}; \quad (3.13)$$

$$d_{ср} = \frac{l_{оп}}{2\alpha + 1} \left(\frac{r_{дп}}{r_{оп}} \right)^{6\alpha}; \quad d_{ср} = l_{кск}^{max} / (2\alpha + 1); \quad (3.14)$$

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / \sigma_{мд}}; \quad b_0 = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / \sigma_{рас}}; \quad b_\tau = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / 2\tau_{сдв}}. \quad (3.15)$$

Соотношениями (3.7) – (3.9) и (3.11) – (3.15), опираясь на ФКСВ модель воздействия взрыва зарядов ПВВ на породу, впервые установлены теоретические закономерности формирования кусков породы на любых расстояниях от зарядной полости, т.е. степень её разрушения, в зоне регулируемого дробления. При этом для установления реального распределения кусков в развале достаточно определить только значения параметров α , $l_{оп}$ и $r_{оп}$ в разных зонах разрушения.

3.2 Модель формирования granulометрического состава при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ в горных породах

При анализе результатов взрывного дробления (глава 3. – настоящей диссертации) была принята модель (рисунок 3.1) их взрывного разрушения в виде:

$$V_{op} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4, \quad (3.16)$$

где $V_1 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{op}^3$ – объём раздробленной горной массы, приходящий на верхней и нижней части заряда;

$V_2 = \pi \cdot l_{зар} \cdot r_{op}^2$ – объём раздробленной горной массы, приходящий на всю длину заряда;

$V_3 = -\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{ун}^2 \cdot r_{op}$ – объём зарядной полости в верхней части действия заряда, который не участвует в формировании granulометрического состава;

$V_4 = -\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{ун}^2 \cdot l_{зар}$ – объём зарядной полости по всей длине действия заряда, который не участвует в формировании granulометрического состава.

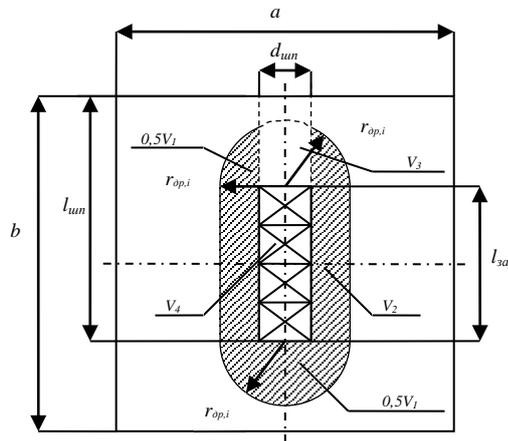


Рисунок 3.1 – Схема формирования зон разрушения.

Тем самым предполагалось, что размеры частиц в зоне дробления возрастают с удалением от заряда. Аналогичная модель формирования зон разрушения была предложена и для взрыва сосредоточенного заряда.

3.3 Теоретические оценки формирования кусков породы при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ

При оценке эффективности взрывного дробления ГП основными критериями, определяющими эффективность ведения взрывных и последующих ГР, являются: *выход негабарита, степень дробления ГП*, форма развала, количество «порогов» и т.д., причем первые два принято считать главными. Поэтому была поставлена и решена задача по установлению обобщающей зависимости степени разрушения ГП в зоне регулируемого дробления с учетом реального распределения напряжений в разрушаемой породе. Теоретический подход к описанию процесса разрушения ГП в зоне регулируемого дробления при взрывах зарядов ПВВ проанализированный и приведенный в настоящей диссертации, подтвержденный результатами лабораторных и опытно-промышленных исследований излагаем ниже.

Соответствующие зависимости устанавливаются отдельно для каждого из указанных выше главных критериев взрывного дробления ГП.

3.3.1 Выход негабарита

Установлено [75], что b_0 – радиус зоны регулируемого дробления ГП при взрыве удлиненного заряда ПВВ, рассчитывается по (2.21):

$$b_0 = a_0 \cdot \sqrt{P_{\text{ж}} / \kappa_3 \sigma_{\text{рас}}}, \text{ м}; \quad (3.17)$$

где a_0 – радиус зарядной полости, м; $P_{\text{ж}}$ – давление продуктов детонации (ПД) в точке Жуге, Па; $\sigma_{\text{рас}}$ – предел прочности пород на одноосное растяжение, Па; $\kappa_3 = 1 + \frac{2\gamma P_{\text{ж}}}{E}(1 + \mu)$; γ – показатель изоэнтропы ПД; E – модуль упругости (Юнга) породы, Па; μ – коэффициент Пуассона породы, характеризующий её сжимаемость.

В свою очередь, давление $P_{\text{ж}}$ при детонации цилиндрического заряда ПВВ определяется соотношением вида (2.11, 2.28):

$$P_{\text{ж}} = \Delta D^2 / (\gamma + 1), \quad (3.18)$$

где Δ – плотность заряжения ПБВ, кг/м³; D – скорость детонации заряда, м/с.

С учетом (3.17) и (3.18), в [73] показано, что если a – расстояние между рядами в ряду и b – расстояние между рядами зарядов – удовлетворяют соотношениям:

$$a \geq 2b_0; \quad b \geq 2b_0, \quad (3.19)$$

то выход негабарита описывается соотношением:

$$V_n^+ = V_c^+ (1 - \bar{q}), \quad \bar{q} \leq 1. \quad (3.20)$$

где V_n^+ – выход негабарита в развале, %; V_c^+ – содержание негабарита в массиве (до взрыва), %;

$$\bar{q} = d_{зр}^2 \Delta D^2 [(\gamma + 1) ab \sigma_{рас}]^{-1}. \quad (3.21)$$

где $d_{зар}$ – диаметр зарядной полости, $d_{зар} = 2a_0$, м. При этом зона регулируемого дробления приближенно описывается соотношением $v_{р\partial} = 4b_0^2 l_{зар}$, а зона нерегулируемого дробления равна $v_{н\partial} = (ab - 4b_0^2) \cdot l_{зар}$. При условиях (3.19) параметр $\bar{q} \leq 1$. Если же принять:

$$a \leq 2b_0; \quad b \leq 2b_0, \quad (3.22)$$

то $\bar{q} \geq 1$ и выхода негабарита не будет при исключении отрицательного взаимного влияния взрыва соседних зарядов на процесс разрушения ими породы. Соотношения (3.20) и (3.21) являются теоретическим обобщением известных результатов опытных и опытно-промышленных исследований В.К. Рубцова [161] и хорошо согласуются с результатами последующих опытно-промышленных исследований других авторов. Таким образом, соотношения (3.17) – (3.22) впервые позволяют надежно прогнозировать значения первого главного критерия взрывного дробления ГП – выход негабарита.

3.3.2 Средний размер куска в развале

Как правило, степень дробления ГП на карьерах оценивается средним размером кусков породы в развале – вторым главным критерием взрывного дробле-

ния ГП. Средний размер кусков породы в развале при $\bar{q} \leq 1$ в соответствии с [73] определяется соотношением:

$$d_{cp} = l_{cp} [1 - \bar{q} (1 - \bar{d}_{cp1})], \text{ м}; \quad (3.23)$$

где l_{cp} – средний размер кусков в массиве (до взрыва), м; $\bar{d}_{cp1} = d_{cp1} / l_{cp}$; $d_{cp,1}$ – средний размер кусков породы в зоне регулируемого дробления, т.е. при $r \leq b_0$. Очевидно, $d_{cp,1}$ определяется гранулометрическим составом раздробленной ГП в зоне регулируемого дробления. Если же $\bar{q} \geq 1$, то $d_{cp} = d_{cp,1}$.

Таким образом, для определения второго главного критерия эффективности взрывного дробления ГП – среднего размера кусков в развале – необходимо установить зависимость степени разрушения ГП в зоне регулируемого дробления от свойств последних, типа ПВВ, схем расположения и инициирования зарядов.

3.4 Экспериментальные лабораторные исследования взрывного дробления образцов

Проведение исследований взрывного дробления образцов в лабораторных условиях проводилось на основании Лицензий Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) № ПВ-00-005309 (В) от 03.05.2005 г. и № ИВ-00-005308 (В) от 03.05.2005 г. выданных Автономной некоммерческой организации «НАЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ-ВЗРЫВНИКОВ В ПОДДЕРЖКУ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО И СОЦИАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ» (АНО НОИВ).

ВВ изготовлялось в день проведения работ, а после выполнения запланированных исследований оставшаяся часть ВВ уничтожалась.

3.4.1 Применяемое оборудование

Процессы взрывного разрушения образцов пород и искусственных материалов проводились в стальной металлической камере с внутренними размерами

300×300×200 мм при толщине стенок камеры равной 10 мм (рисунок 3.2). Камера плотно закрывается крышкой такой же толщиной в 10 мм и имеет клеммы для подсоединения проводников инициаторов зарядов, размещаемых в разрушаемых образцах. Камера не разрушается при взрывах в ней зарядов с энергией до 1×10^4 Дж.

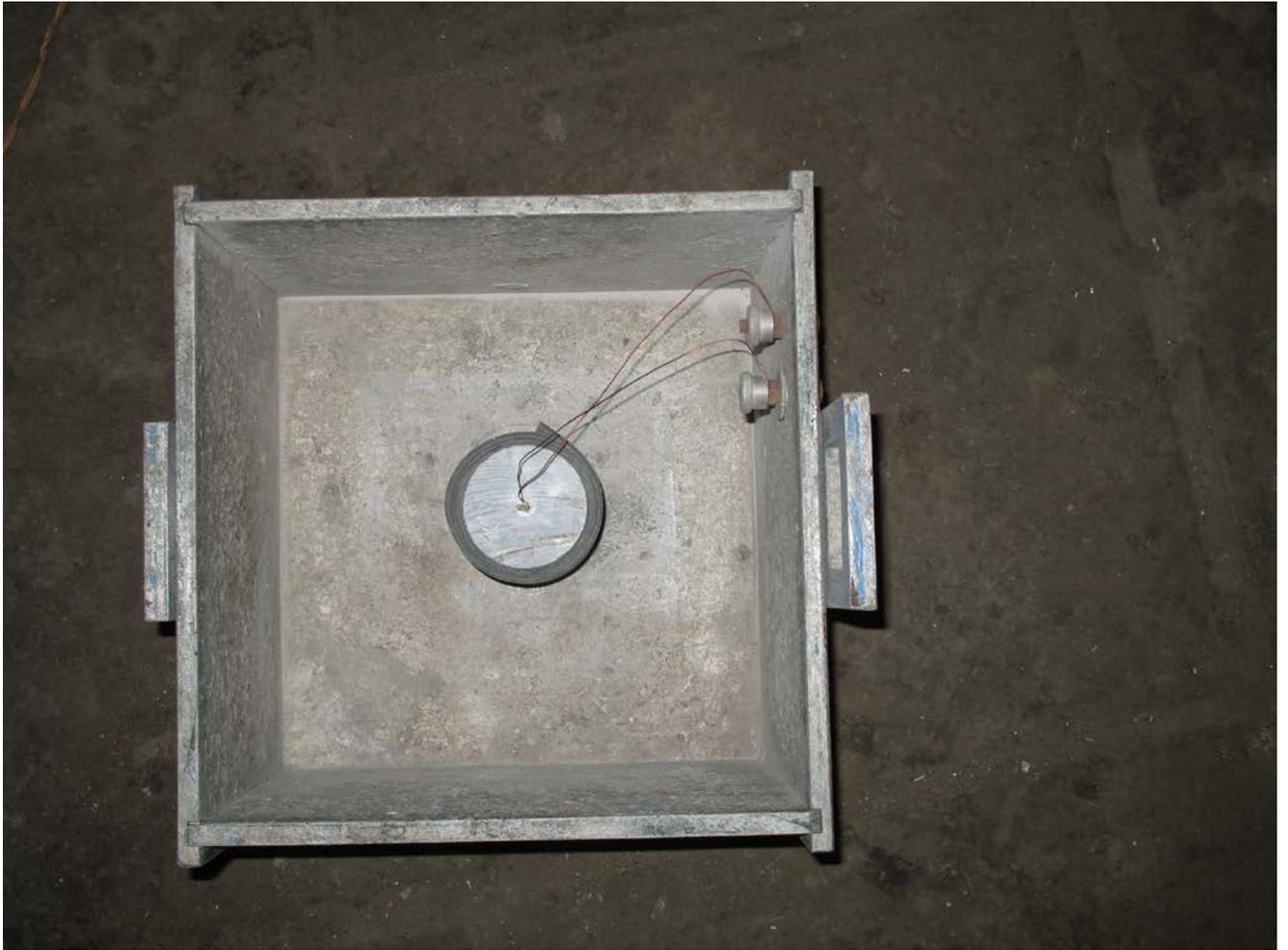


Рисунок 3.2 – Фотография камеры с взрываемым образцом.

Линейные размеры образцов, сверл, глубины шпуров и т.д. определялись электронным штангельциркулем с погрешностью до $\pm 0,2$ мм.

Гранулометрический состав в массе, получающейся при взрывном разрушении образцов, определяли с помощью сит из нержавеющей стали с круглыми отверстиями диаметрами 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 5; 7; 10; 16; 20 и 30 мм, что позволяло разделить эту массу на 12 фракций.

Для определения массы каждой фракции использовались калиброванные рычажные лабораторные весы, позволяющие определять массы этих фракций и образцов с погрешностью в ± 1 г при максимальном значении масс до 1,5 кг.

3.4.2 Взрывчатое вещество

Взрывное дробление образцов осуществлялось с помощью зарядов пиротехнического состава¹ (ПС) с энергией Q – взрывчатого превращения в продукты детонации (ПД), равной 5024 Дж/г (1200 кал/г). ПС представляет собой белый кристаллический порошок с размерами частиц $0,25 \leq d_{\text{част}} \leq 0,5$ мм, который надежно инициируется в шпурах диаметром $d_{\text{шп}} \geq 1$ мм. Скорость детонации открытого заряда ПС диаметром $d_{\text{зар}} = 2$ мм составляла $D = 1290$ м/с.

Как известно [45], скорость детонации ПВВ в стальной оболочке и в шпурах и скважинах, пробуренных в породах, по крайней мере в 2 раза больше скорости детонации открытого заряда.

Следовательно, скорость детонации зарядов чистого ПС в разрушаемых образцах составляла порядок 2600 м/с. Путем добавления в ПС порошка поваренной соли с размерами частиц менее 0,25 мм теплота взрывчатого превращения смеси Q составляла $Q_3=2512$ Дж/г (600 кал/г); $Q_4=3350$ Дж/г (800 кал/г); $Q_5=4187$ Дж/г (1000 кал/г); $Q_6=5024$ Дж/г (1200 кал/г). При этом была подтверждена теоретическая зависимость D от Q в виде $D \sim \sqrt{Q}$.

Теплота взрывчатого превращения и соответствующие значения ПС $P_{\text{ж}}$ представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения $P_{\text{ж}}$ при разных Q для ПС

Q , Дж/г	2512	3350	4187	5024
$P_{\text{ж}} \cdot 10^{-9}$, Па	1,949	2,251	2,466	2,757

¹ Пиротехнический состав (ПС) – «НОУ-ХАУ» каф. РГПВ МГГУ.

Инициирование зарядов ПС осуществлялись путем взрыва в них тонкой нихромовой проволочки под действием электрического тока от бытовой электросети напряжением в 220 В.

3.4.3 Последовательность выполнения операций при проведении опытов в лабораторных условиях

1. Осуществлялась подготовка заряда ПС заданной массы.
2. В подготовленном к опыту образце просверливался шпур с заданными значениями диаметра и длины. Тщательно измерялись геометрические параметры образца и шпура. Образец взвешивался. Результаты всех измерений обязательно контролировались, после чего они записывались в специальный журнал.
3. Тщательно очищалась взрывная камера, и подавался предупредительный сигнал.
4. В образце шпур заряжался пиротехническим составом заданной массы, а в верхней части заряда размещался инициатор в виде нихромовой проволочки с соединительными проводами.
5. Осуществлялась забойка шпура чистым кварцевым песком и фиксация, крепление скотчем соединительных проводов инициаторов на образце.
6. Образец с заряженным шпуrom устанавливался на дно взрывной камеры, к клеммам которой подключались соединительные провода инициатора. Все сотрудники кроме старшего взрывника удалялись из помещения, в котором расположена взрывная камера.
7. Камера плотно закрывалась крышкой и монтировалась взрывная сеть. После проверки правильности монтажа взрывной сети подавался второй боевой сигнал и осуществлялся взрыв.
8. Открывалась камера, осуществлялся демонтаж взрывной сети, и проветривалось помещение, в котором находится эта камера.
9. Через ~ 15 минут после взрыва старший взрывник осматривал взрывную камеру и степень дробления образца и подавал третий сигнал – отбой.

10. Содержимое взрывной камеры высыпалось на широкий лист бумаги (рисунок 3.3), и удалялись соединительные провода, листы резины и другие предметы, не относящиеся к разрушенной породе.

11. Осуществлялся рассев раздробленной породы и взвешивание каждой фракции. Результаты взвешивания записывались в специальный журнал.

12. Сопоставлялась общая масса всех фракций с массой образца до взрыва. Различия этих масс до 3 г при общей массе образцов ~ 1,5 кг считалось допустимым. Если различия общей массы всех фракций и массы образца достигало 15 г и более, то обязательно несколько раз проводилось повторное взвешивание всех фракций и устанавливалась ошибка измерений, которая затем исключалась из записей.



Рисунок 3.3 – Фотография взорванного образца.

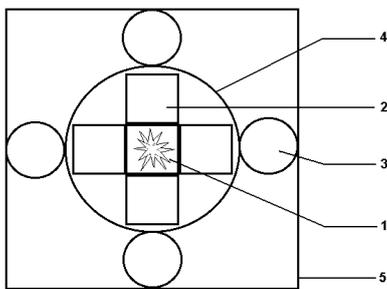
Меры по исключению дополнительного механического дробления кусков породы:

I. При взрывном дроблении кубических образцов чтобы избежать дополнительного механического дробления отдельных кусков в результате соударения последних со стенками камеры были приняты следующие меры:

- к каждой из четырех вертикальных граней разрушаемого образца плотно прижимались кубики такой же породы и таких же размеров, что и разрушаемый образец;

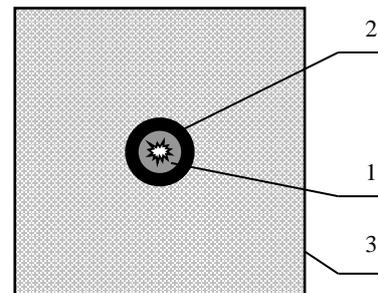
- вся группа из пяти кубиков несколько раз плотно оборачивались резиновыми листами толщиной в 3 мм;

- вся группа из пяти кубиков плотно фиксировалась во взрывной камере с помощью четырех пустых пластиковых бутылок (рисунок 3.4, а).



а) расположение в камере кубических образцов

- 1 – Взрываемый блок
- 2 – Амортизирующие блоки
- 3 – Амортизирующие полости
- 4 – Резиновый кожух (3 мм)
- 5 – Металлическая камера



б) расположение в камере цилиндрических образцов

- 1 – Взрываемый образец
- 2 – Резиновый кожух
- 3 – Металлическая камера

Рисунок 3.4 – Схема размещения взрываемых образцов в камере.

В этом случае разлет кусков разрушаемого блока в сторону боковых граней взрывной камеры был локализован, и не происходило их соударение с этими стенками. После взрыва между стенками взрывной камеры и листами резины обнаруживалось только несколько небольших кусков от разрушаемого образца (не более 1% от объема образца).

II. Перед взрывным дроблением цилиндрического образца из полигалитовой породы он оборачивался несколько раз резиновым листом толщиной 3 мм. То есть образец находился как бы в цилиндрической резиновой трубке (рисунок 3.4, б).

После взрыва раздробленная порода оставалась внутри этой резиновой трубки. За её пределами во взрывной камере находились обычно несколько небольших кусков, масса которых не превышала 1% от массы образца. Таким образом, и в этом случае был исключен процесс дополнительного механического дробления кусков породы вследствие их соударения с боковыми стенками взрывной камеры.

III. Для исключения соударения кусков, разрушаемых взрывом образцов, с металлической крышкой взрывной камеры, все образцы перед взрывом накрывались тремя – четырьмя слоями резиновых листов.

Изложенные выше меры по локализации разлета и дополнительного дробления кусков породы о стенки взрывной камеры при взрывном разрушении в ней образцов были разработаны в результате многолетних исследований этих процессов на кафедре РГПВ МГГУ и в АНО НОИВ.

3.4.4 Лабораторные исследования взрывного дробления силикатных блоков

Разрушению подвергались силикатные блоки размером $120 \times 120 \times 64$ мм и $60 \times 60 \times 64$ мм с следующими физико-техническими свойствами: $\rho = 2,1 \cdot 10^3$ кг/м³; $E = 1,5 \cdot 10^9$ Па; $\mu = 0,1$; $\sigma_{сж} = 2,31 \cdot 10^7$ Па; $\sigma_{сдв} = 1,735 \cdot 10^7$ Па; $\sigma_{рас} = 2,74 \cdot 10^6$ Па. Зерна силикатных блоков были размером ~ 2 мм, а пористость составляла $\sim 4,7\%$.

В первых 9 опытах отработывалась методика их проведения и системы амортизации, исключающие соударение кусков породы со стенками камеры. С фиксированными параметрами зарядов и размеров блоков проводилось, как правило, по 4 опыта. Разрушенная взрывом масса от этих взрывов смешивалась, обеспечивая усреднения результатов опытов. Затем производился её рассев и взвешивание фракций от 0,5 до 30 мм. Общая масса фракций отличалась от общего веса образцов до взрыва не более чем на 0,1%. В качестве забойки использовался чистый кварцевый песок с размерами частиц $0,25 \leq d_{нк} \leq 0,5$ мм. При анализе

опытных данных объем песка исключался из объема соответствующих фракций. Всего было проведено 19 серий опытов.

3.4.5 Анализ взрывного дробления силикатных блоков

Обработка экспериментальных данных выполнялась в соответствии с ФКСВ теорией разрушения ГП взрывом зарядов ПВВ.

При анализе результатов взрывного дробления силикатных блоков была принята модель их взрывного разрушения (рисунок 3.1 и (3.16)) приведённая в разделе 3.2 главы 3 настоящей диссертации.

Обработка опытных данных проводилась в следующей последовательности:

1. Определялись объемы каждой i -ой фракции:

$$V_{\partial p,i} = \frac{m_{\text{нор},i}}{\rho_{\text{нор}}}, \quad (3.24)$$

где $m_{\text{нор},i}$ - массы i -ой фракции.

2. Рассчитывалась сумма всех объемов фракций:

$$V_{\partial p,k}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^k V_{\partial p,k}^{(i)}; \quad 1 \leq i \leq k. \quad (3.25)$$

3. Находился средний размер кусков первых k фракций:

$$d_{\Sigma,k}^{cp} = \left(\sum_{i=1}^k m_{\text{нор},i} \cdot d_{k,i}^{cp} \right) / \left(\sum_{i=1}^k m_{\text{нор},i} \right). \quad (3.26)$$

4. Рассчитывалось \bar{d}_{cp} - относительные значения средних кусков:

$$\bar{d}_{cp,\Sigma} = \frac{d_{\Sigma,k}^{cp}}{l_k^{\max}}. \quad (3.27)$$

5. Рассчитывалось нормированное значение относительных средних величин:

$$\hat{d}_{cp}^o = \frac{\bar{d}_{cp,\Sigma}}{d_{cp}}. \quad (3.28)$$

6. Рассчитывался $r_{\partial p}$, мм - радиус зоны разрушения заданного уровня по соотношениям:

а) Удлиненный заряд:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{dp}^3 + \pi \cdot l_{zap} \cdot r_{dp}^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{ш}^2 \cdot r_{dp} - \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{ш}^2 \cdot l_{zap} + V_{dp} \right) = 0. \quad (3.29)$$

б) Сосредоточенный заряд:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{dp}^3 + 0 \cdot r_{dp}^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{ш}^2 \cdot r_{dp} - \left(\frac{1}{8} \cdot \pi \cdot d_{ш}^2 \cdot l_{zap} + V_{dp} \right) = 0. \quad (3.30)$$

7. Определялся параметр распределения дефектов:

$$\alpha = 0,5 \cdot \left(\frac{1}{\bar{d}_{cp,\Sigma}} - 1 \right). \quad (3.31)$$

8. Рассчитывалось нормированное значение максимального размера кусков:

$$\bar{l}_{\varepsilon,\kappa}^{\max} = \frac{l_{\varepsilon,\kappa}^{\max}}{l_{он,\varepsilon}^{\max}}. \quad (3.32)$$

Для каждого процесса разрушения породы необходимо принимать свои опорные значения. В зоне мелкодисперсного дробления в качестве опорного значения принимается $l_{он1}^{\max} = 1$ мм, а в зоне интенсивного трещинообразования $l_{он2}^{\max} = 5$ мм.

9. Выбиралось за основу опорное значения зон разрушения с внешними радиусами:

$$\text{а) } r_{он1} = r_{др2}; \quad \text{б) } r_{он2} = r_{др5}; \quad (3.33)$$

где $r_{др,2}$ - внешний радиус зоны дробления, максимальный кусок в которой равен 1 мм; $r_{др,5}$ - внешний радиус зоны, максимальный размер куска в которой равен 5 мм.

10. Рассчитывалось:
$$\bar{r}_{dp} = \frac{r_{dp,i}}{r_{он}}. \quad (3.34)$$

11. Рассчитывалось теоретическое распределение кусков в зоне регулируемого дробления:

11.1. Взрыв удлиненного заряда:

$$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max} = \left(\frac{r_{dp}}{r_{он}} \right)^{4\alpha} = (\bar{r}_{dp})^{4\alpha}. \quad (3.35)$$

11.2. Взрыв сосредоточенного заряда:

$$\bar{l}_{T,k}^{\max} = \left(\frac{r_{op}}{r_{on}} \right)^{6\alpha} = (\bar{r}_{op})^{6\alpha}. \quad (3.36)$$

$$12. \text{ Рассчитывалось отношение: } \hat{l}_{T,k}^{\max} = \frac{\bar{l}_{T,k}^{\max}}{\bar{l}_{\Sigma,k}^{\max}}. \quad (3.37)$$

В таблицах 3.2 – 3.20 приводятся результаты расчетов взрывного дробления силикатных блоков с 10 по 28 опыт.

Результаты обработки опытных данных для взрывного дробления силикатных блоков представлены на рисунках 3.5 и 3.6 и удовлетворительно согласуются с предложенной моделью процесса формирования кусков породы в зоне регулируемого дробления.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов 10 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	≤0,5	0,5 < d ≤ 1	1 < d ≤ 2	2 < d ≤ 3	3 < d ≤ 5	5 < d ≤ 7	7 < d ≤ 10	10 < d ≤ 20	20 < d ≤ 30
l_k^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_k^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	7	5	4,125	5	8,25	7	10,5	0	0
$V_{op,k}$, см ³	3,33	2,38	1,96	2,38	3,93	3,33	5	-	-
$V_{op,k}^{\Sigma}$, см ³	3,33	5,71	7,67	10,05	13,98	17,31	22,31	-	-
$d_{\Sigma,k}^{cp}$, мм	0,21	0,435	0,707	1,132	1,937	2,719	4,014	-	-
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,435	0,3535	0,377	0,3874	0,388	0,4014	-	-
\hat{d}_{cp}^o	1,06	1,1	0,89	0,95	0,98	0,98	1,02	-	-
r_{op} , мм	6,8243	8,4049	9,4324	10,482	11,921	12,957	14,314	-	-
α	0,6905	0,6494	0,9144	0,8263	0,7907	0,7887	0,7456	-	-
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,598	3,658	3,305	3,163	3,1546	2,9826	-	-
$\bar{l}_{\Sigma,k}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	-	-
\bar{r}_{op} , мм	0,8116	1	0,7905	0,8788	1	1,0869	1,2007	-	-
$\bar{l}_{T,k}^{\max}$	0,562	1	0,423	0,652	1	1,301	1,7206	-	-
$\hat{l}_{T,k}^{\max}$	1,124	1	1,058	1,087	1	0,929	0,8603	-	-

Таблица 3.3 – Результаты расчетов 11 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m_{нор}$, г	4	3,875	3,5	4,125	6,75	6	9,75	0	0
$V_{оп,κ}$, см ³	1,9048	1,8452	1,6667	1,9643	3,2143	2,8571	4,6429	-	-
$V_{оп,κ}^{\Sigma}$, см ³	1,9048	3,75	5,4167	7,381	10,5952	13,4524	18,0952	-	-
$d_{\Sigma,κ}^{cp}$, мм	0,21	0,4757	0,7909	1,2457	2,0813	2,9136	4,3469	-	-
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,4757	0,3954	0,4152	0,4162	0,4162	0,4347	-	-
\hat{d}_{cp}^o	0,9887	1,1199	0,9309	0,9775	0,9799	0,9799	1,0233	-	-
$r_{оп}$, мм	8,274	10,078	11,273	12,411	13,913	15,008	16,513	-	-
α	0,6905	0,5511	0,7644	0,7041	0,7012	0,7013	0,6502	-	-
$6 \cdot \alpha$	4,143	3,306	4,587	4,225	4,207	4,208	3,901	-	-
$\bar{l}_{э,κ}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	-	-
$\bar{r}_{оп}$, мм	0,821	1	0,8102	0,8921	1	1,0788	1,1869	-	-
$\bar{l}_{T,κ}^{\max}$	0,4417	1	0,3809	0,6173	1	1,3757	1,9511	-	-
$\hat{l}_{T,κ}^{\max}$	0,8834	1	0,9523	1,0288	1	0,9826	0,9756	-	-

Таблица 3.4 – Результаты расчетов 12 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m_{нор}$, г	6,65	5,5	4,75	5,75	9,625	6,17	4,75	0	0
$V_{оп,κ}$, см ³	3,1561	2,6103	2,2544	2,729	4,5681	2,9283	2,2544	-	-
$V_{оп,κ}^{\Sigma}$, см ³	3,1561	5,7665	8,0209	10,7499	15,318	18,2463	20,5007	-	-
$d_{\Sigma,κ}^{cp}$, мм	0,21	0,4544	0,7483	1,193	2,0301	2,6672	3,3086	-	-
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,4544	0,3741	0,3977	0,406	0,381	0,3309	-	-
\hat{d}_{cp}^o	1,0636	1,1508	0,9475	1,007	1,0282	0,9649	0,8379	-	-
$r_{оп}$, мм	6,2002	7,8516	8,9577	10,075	11,6138	12,4565	13,05	-	-
α	0,6905	0,6002	0,8363	0,7573	0,7315	0,8122	1,0112	-	-
$4 \cdot \alpha$	2,7619	2,401	3,3454	3,0293	2,9259	3,2489	4,0448	-	-
$\bar{l}_{э,κ}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	-	-
$\bar{r}_{оп}$, мм	0,7897	1	0,7713	0,8675	1	1,0726	1,1237	-	-
$\bar{l}_{T,κ}^{\max}$	0,5209	1	0,4195	0,6501	1	1,2556	1,6026	-	-
$\hat{l}_{T,κ}^{\max}$	1,0418	1	1,0487	1,0836	1	0,8968	0,8013	-	-

Таблица 3.5 – Результаты расчетов 13 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	6,375	5,75	2,136	6,625	12	9,75	17,25	47	90,875
$V_{op,\kappa}$, см ³	3,026	2,729	1,014	3,144	5,695	4,627	8,187	22,307	43,13
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	3,026	5,755	6,768	9,913	15,61	20,235	28,42	50,729	93,859
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,466	0,621	1,217	2,233	3,094	4,651	9,202	16,461
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,466	0,311	0,406	0,447	0,442	0,465	0,46	0,549
\hat{d}_{cp}^o	0,953	1,058	0,705	0,921	1,014	1,003	1,056	1,044	1,246
r_{op} , мм	9,341	11,4	11,997	13,55	15,69	17,068	19,07	23,078	28,282
α	0,691	0,573	1,111	0,733	0,62	0,631	0,575	0,587	0,411
$\beta \cdot \alpha$	4,143	3,437	6,663	4,395	3,72	3,787	3,45	3,521	2,467
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,82	1	0,765	0,864	1	1,088	1,216	1,471	1,803
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,439	1	0,167	0,525	1	1,376	1,962	3,891	4,28
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,877	1	0,418	0,875	1	0,983	0,981	0,973	0,713

Таблица 3.6 – Результаты расчетов 14 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	13,75	10,875	9,5	10,5	18,625	17,5	25,25	76	96,625
$V_{op,\kappa}$, см ³	6,465	5,113	4,466	4,937	8,757	8,228	11,87	35,73	45,428
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	6,465	11,577	16,044	20,98	29,737	37,96	49,84	85,57	130,99
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,449	0,741	1,155	1,993	2,861	4,204	8,713	14,36
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,449	0,371	0,385	0,399	0,409	0,42	0,436	0,479
\hat{d}_{cp}^o	1,004	1,072	0,886	0,92	0,952	0,977	1,005	1,041	1,144
r_{op} , мм	6,945	8,945	10,3	11,56	13,41	14,87	16,66	20,82	24,74
α	0,691	0,615	0,849	0,799	0,755	0,723	0,689	0,648	0,545
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,46	3,397	3,195	3,018	2,893	2,757	2,591	2,178
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,776	1	0,768	0,862	1	1,109	1,242	1,553	1,845
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,497	1	0,408	0,622	1	1,348	1,819	3,126	3,794
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,994	1	1,02	1,037	1	0,963	0,909	0,782	0,632

Таблица 3.7 – Результаты расчетов 15 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	6,625	5,875	4,625	6,75	9,5	11,25	14,625	59,75	105
$V_{op,\kappa}$, см ³	3,086	2,736	2,154	3,144	4,425	5,24	6,812	27,83	48,905
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	3,086	5,822	7,976	11,12	15,55	20,785	27,597	55,43	104,33
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,464	0,744	1,24	2,026	3,028	4,378	9,712	16,878
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,464	0,372	0,413	0,405	0,433	0,438	0,486	0,563
\hat{d}_{cp}^o	0,947	1,046	0,838	0,932	0,913	0,975	0,987	1,095	1,268
r_{op} , мм	5,978	7,791	8,88	10,185	11,68	13,14	14,73	19,42	25,32
α	0,691	0,578	0,845	0,7095	0,734	0,656	0,642	0,5297	0,3887
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,312	3,379	2,838	2,936	2,624	2,568	2,119	1,555
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,767	1	0,76	0,872	1	1,125	1,261	1,662	2,167
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,481	1	0,396	0,678	1	1,362	1,813	2,935	3,329
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,963	1	0,989	1,129	1	0,973	0,906	0,734	0,555

Таблица 3.8 – Результаты расчетов 16 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	11,35	9,95	8,525	13,65	19,625	18,025	24,65	0	0
$V_{op,\kappa}$, см ³	5,3286	4,6714	4,0023	6,4085	9,2136	8,4624	11,5728	-	-
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	5,3286	10	14,0023	20,411	29,624	38,0869	49,6596	-	-
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,4623	0,7589	1,3055	2,1436	3,0004	4,282	-	-
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,4623	0,3794	0,4352	0,4287	0,4286	0,4282	-	-
\hat{d}_{cp}^o	0,9858	1,0849	0,8906	1,0214	1,0062	1,006	1,005	-	-
r_{op} , мм	11,2481	13,681	15,2268	17,189	19,3972	21,0501	22,9623	-	-
α	0,6905	0,5817	0,8177	0,6489	0,6663	0,6665	0,6677	-	-
$6 \cdot \alpha$	4,1429	3,4899	4,9064	3,8937	3,9977	3,999	4,006	-	-
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	-	-
\bar{r}_{op} , мм	0,8222	1	0,785	0,8861	1	1,0852	1,1838	-	-
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,4443	1	0,3049	0,6246	1	1,3869	1,9658	-	-
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,8886	1	0,7623	1,041	1	0,9906	0,9829	-	-

Таблица 3.9 – Результаты расчетов 17 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	3,5	6	8,5	15	25

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8
m_{nop} , г	6,6	6,425	5,75	20,125	10,075	16,2	0	0
$V_{op,\kappa}$, см ³	3,1324	3,0494	2,729	9,5515	4,7817	7,6887	-	-
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	3,1324	6,1818	8,9108	18,4623	23,2439	30,9326	-	-
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,4764	0,7899	2,192	2,9753	4,3486	-	-
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,4764	0,3949	0,4384	0,425	0,4349	-	-
\hat{d}_{cp}^o	0,9731	1,1037	0,915	1,0157	0,9848	1,0075	-	-
r_{op} , мм	9,4632	11,6725	13,1067	16,5769	17,8648	19,6165	-	-
α	0,6905	0,5496	0,766	0,6405	0,6763	0,6498	-	-
$6 \cdot \alpha$	4,1429	3,2976	4,5962	3,8432	4,058	3,8988	-	-
$\bar{l}_{\varepsilon,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	1	1,4	2	-	-
\bar{r}_{op} , мм	0,8107	1	0,7907	1	1,0777	1,1834	-	-
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,4192	1	0,3397	1	1,3548	1,9279	-	-
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,8385	1	0,8493	1	0,9677	0,9639	-	-

Таблица 3.10 – Результаты расчетов 18 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	15,68	11,625	9,375	12,75	18,125	17,125	24,125	53	113,5
$V_{op,\kappa}$, см ³	7,56	5,608	4,522	6,151	8,743	8,261	11,64	25,57	54,75
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	7,56	13,17	17,69	23,84	32,59	40,85	52,48	78,05	132,8
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,44	0,711	1,172	1,931	2,754	4,028	7,622	14,79
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,44	0,356	0,391	0,386	0,393	0,403	0,381	0,493
\hat{d}_{cp}^o	1,03	1,081	0,873	0,96	0,949	0,967	0,99	0,937	1,211
r_{op} , мм	7,43	9,46	10,74	12,21	13,939	15,331	17,022	20,05	24,87
α	0,69	0,637	0,907	0,779	0,795	0,771	0,741	0,812	0,514
$4 \cdot \alpha$	2,76	2,546	3,627	3,118	3,178	3,083	2,965	3,248	2,058
$\bar{l}_{\varepsilon,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,79	1	0,771	0,876	1	1,1	1,221	1,439	1,784
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,51	1	0,389	0,661	1	1,341	1,808	3,257	3,292
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,03	1	0,972	1,102	1	0,958	0,904	0,814	0,549

Таблица 3.11 – Результаты расчетов 19 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	11,425	10,375	8,75	10,38	19,875	18	27,125	83,75	101,13
$V_{op,\kappa}$, см ³	5,404	4,908	4,139	4,908	9,402	8,515	12,83	39,62	47,84
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	5,404	10,31	14,45	19,36	28,76	37,28	50,11	89,72	137,56
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,467	0,763	1,203	2,118	3,004	4,412	9,087	14,621
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,467	0,381	0,401	0,424	0,429	0,441	0,454	0,487
\hat{d}_{cp}^o	0,968	1,076	0,879	0,924	0,976	0,989	1,017	1,047	1,123
r_{op} , мм	11,11	13,67	15,26	16,79	19,12	20,82	22,96	27,84	32,08
α	0,691	0,571	0,811	0,747	0,681	0,665	0,633	0,601	0,526
$\delta \cdot \alpha$	4,143	3,424	4,865	4,48	4,084	3,99	3,8	3,602	3,156
$\bar{l}_{\varepsilon,\kappa}^{\max}$	0,5	1	2	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,813	1	1,116	0,878	1	1,089	1,201	1,456	1,678
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,424	1	1,705	0,559	1	1,406	2,005	3,874	5,124
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,847	1	0,852	0,931	1	1,004	1,002	0,969	0,854

Таблица 3.12 – Результаты расчетов 20 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	10,75	8,625	8,125	10	18	17,125	23,125	67,13	115
$V_{op,\kappa}$, см ³	4,979	3,995	3,763	4,632	8,337	7,932	10,71	31,09	53,27
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	4,979	8,974	12,74	17,369	25,71	33,64	44,349	75,44	128,71
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,45	0,761	1,224	2,125	3,038	4,35	8,744	15,47
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,45	0,38	0,408	0,425	0,434	0,436	0,437	0,516
\hat{d}_{cp}^o	0,968	1,038	0,876	0,94	0,979	1	1,004	1,007	1,188
r_{op} , мм	10,83	13,07	14,64	16,2	18,42	20,13	22,05	26,28	31,38
α	0,691	0,61	0,815	0,725	0,677	0,652	0,648	0,644	0,47
$\delta \cdot \alpha$	4,143	3,661	4,89	4,351	4,06	3,912	3,885	3,862	2,817
$\bar{l}_{\varepsilon,\kappa}^{\max}$	0,5	1	2	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,828	1	1,12	0,879	1	1,092	1,197	1,427	1,703
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,458	1	1,742	0,572	1	1,413	2,009	3,945	4,483
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,916	1	0,871	0,953	1	1,009	1,005	0,986	0,747

Таблица 3.13 – Результаты расчетов 21 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	21,625	19,13	16,88	21,63	39,13	40,75	72,88	103,8	62
$V_{op,\kappa}$, см ³	10,23	9,047	7,983	10,23	18,51	19,28	34,47	49,08	29,33
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	10,23	19,28	27,26	37,488	55,996	75,27	109,7	158,8	188,15
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,463	0,767	1,24	2,152	3,138	4,822	7,967	10,62
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,463	0,384	0,413	0,43	0,448	0,482	0,398	0,354
\hat{d}_{cp}^o	0,996	1,1	0,91	0,981	1,021	1,06	1,144	0,945	0,84
r_{op} , мм	10,09	12,98	14,87	16,86	19,83	22,6	27,58	29,27	31,18
α	0,691	0,579	0,804	0,71	0,662	0,616	0,537	0,755	0,912
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,316	3,215	2,839	2,647	2,462	2,148	3,021	3,649
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,778	1	0,75	0,85	1	1,14	1,391	1,476	1,572
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,396	0,631	1	1,38	2,03	3,238	5,209
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,999	1	0,991	1,051	1	0,986	1,015	0,81	0,868

Таблица 3.14 – Результаты расчетов 22 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	12,25	9,875	7,875	9,875	17,25	15	18,75	0	0
$V_{op,\kappa}$, см ³	5,814	4,6868	3,7375	4,6868	8,187	7,1191	8,8989	-	-
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	5,814	10,501	14,238	18,925	27,112	34,2311	43,13	-	-
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,451	0,7264	1,1656	2,0215	2,8489	4,0149	-	-
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,451	0,3632	0,3885	0,4043	0,407	0,4015	-	-
\hat{d}_{cp}^o	1,0368	1,1134	0,8966	0,9592	0,9981	1,0047	0,9911	-	-
r_{op} , мм	7,6017	9,6412	10,9071	12,2397	14,151	15,539	17,04	-	-
α	0,691	0,6086	0,8767	0,7869	0,7367	0,7285	0,7454	-	-
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,434	3,507	3,148	2,947	2,914	2,981	-	-
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	-	-
\bar{r}_{op} , мм	0,789	1	0,7708	0,8649	1	1,0981	1,2041	-	-
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,5187	1	0,4013	0,6334	1	1,3135	1,7399	-	-
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,0374	1	1,0032	1,0556	1	0,9382	0,8699	-	-

Таблица 3.15 – Результаты расчетов 23 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	5,75	4,625	4,25	5,5	9,375	10,625	14,125	47,625	112,13
$V_{op,\kappa}$, см ³	2,815	2,264	2,08	2,692	4,589	5,201	6,914	23,31	54,88
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	2,815	5,078	7,159	9,851	14,44	19,64	26,55	49,865	104,75
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,451	0,756	1,232	2,112	3,14	4,537	9,428	17,587
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,451	0,378	0,411	0,422	0,449	0,454	0,471	0,586
\hat{d}_{cp}^o	0,935	1,004	0,841	0,915	0,94	0,999	1,01	1,05	1,305
r_{op} , мм	5,246	6,743	7,808	8,946	10,52	11,97	13,57	17,57	23,668
α	0,691	0,609	0,823	0,717	0,684	0,614	0,602	0,561	0,353
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,437	3,294	2,869	2,735	2,457	2,409	2,243	1,412
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,778	1	0,742	0,85	1	1,138	1,29	1,6705	2,25
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,4999	1	0,375	0,628	1	1,374	1,847	3,16	3,141
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,9999	1	0,937	1,047	1	0,981	0,924	0,79	0,5235

Таблица 3.16 – Результаты расчетов 24 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	10	8,667	7,667	10,667	17	16,667	29,333	94,667	124,5
$V_{op,\kappa}$, см ³	4,755	4,121	3,646	5,072	8,084	7,925	13,948	45,015	59,201
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	4,755	8,876	12,52	17,594	25,68	33,603	47,552	92,567	151,77
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,461	0,763	1,264	2,125	3,039	4,641	9,679	15,655
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,461	0,382	0,421	0,425	0,434	0,464	0,484	0,522
\hat{d}_{cp}^o	0,942	1,033	0,856	0,945	0,953	0,974	1,041	1,085	1,17
r_{op} , мм	6,079	7,971	9,254	10,718	12,6	14,123	16,337	21,497	26,238
α	0,691	0,585	0,81	0,687	0,676	0,652	0,577	0,533	0,458
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,341	3,24	2,747	2,705	2,607	2,31	2,133	1,833
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,763	1	0,735	0,851	1	1,121	1,297	1,706	2,082
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,473	1	0,368	0,641	1	1,347	1,822	3,125	3,84
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,946	1	0,92	1,069	1	0,962	0,911	0,781	0,639

Таблица 3.17 – Результаты расчетов 25 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	12,75	9,75	9,5	12	23	49,25	45	118	99,25
$V_{op,\kappa}$, см ³	6,05	4,62	4,505	5,69	10,91	23,35	21,34	55,95	47,06
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	6,05	10,67	15,17	20,863	31,769	55,121	76,46	132,41	179,47
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,444	0,76	1,23	2,183	3,8	5,112	9,29	13,41
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,444	0,379	0,411	0,437	0,543	0,511	0,465	0,447
\hat{d}_{cp}^o	0,932	0,985	0,841	0,912	0,969	1,205	1,134	1,031	0,992
r_{op} , мм	8,139	10,24	11,8	13,39	15,82	19,61	22,24	27,39	30,7
α	0,691	0,626	0,82	0,717	0,645	0,421	0,478	0,576	0,619
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,505	3,28	2,867	2,58	1,684	1,913	2,306	2,474
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,795	1	0,746	0,847	1	1,24	1,406	1,732	1,94
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,53	1	0,382	0,62	1	1,436	1,918	3,546	5,16
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,061	1	0,954	1,034	1	1,025	0,959	0,887	0,86

Таблица 3.18 – Результаты расчетов 26 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , г	21,7	18,67	16,67	22,83	45	42,33	76,67	148,17	36,5
$V_{op,\kappa}$, см ³	10,43	8,97	8,009	10,97	21,62	20,34	36,84	71,2	17,54
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	10,43	19,4	27,41	38,38	60	80,35	117,2	188,4	205,9
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,46	0,764	1,26	2,248	3,198	4,865	8,695	10,08
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,46	0,382	0,42	0,45	0,457	0,487	0,435	0,336
\hat{d}_{cp}^o	0,983	1,076	0,894	0,983	1,052	1,069	1,139	1,018	0,787
r_{op} , мм	10,17	13,01	14,9	17,02	20,42	22,62	26,1	31,19	32,24
α	0,691	0,588	0,809	0,69	0,612	0,595	0,528	0,65	0,988
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,35	3,238	2,762	2,449	2,378	2,111	2,6	3,95
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,782	1	0,73	0,833	1	1,107	1,278	1,527	1,579
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,507	1	0,361	0,604	1	1,274	1,678	3,008	6,07
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,014	1	0,902	1,007	1	0,91	0,839	0,752	1,012

Таблица 3.19 – Результаты расчетов 27 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , Г	32,75	25,75	22	30	49,125	46,25	54,63	153	102,25
$V_{op,\kappa}$, см ³	14,33	11,269	9,628	13,129	21,499	20,24	23,91	66,96	44,75
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	14,33	25,602	35,23	48,36	69,86	90,1	114	180,96	225,7
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,448	0,735	1,214	2,072	2,954	4,117	8,144	11,49
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,448	0,368	0,405	0,414	0,422	0,412	0,407	0,383
\hat{d}_{cp}^o	1,028	1,095	0,9	0,991	1,014	1,033	1,007	0,996	0,937
r_{op} , мм	11,09	13,9	15,79	17,88	20,65	22,79	24,96	29,79	32,39
α	0,691	0,617	0,86	0,735	0,707	0,685	0,714	0,728	0,806
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,467	3,44	2,941	2,827	2,739	2,858	2,912	3,223
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,797	1	0,765	0,866	1	1,104	1,209	1,443	1,569
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,534	1	0,397	0,655	1	1,311	1,719	2,91	4,27
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,067	1	0,993	1,091	1	0,936	0,86	0,727	0,712

Таблица 3.20 – Результаты расчетов 28 опыта (силикатные блоки)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	$\leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,5	1	2	3	5	7	10	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,21	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	15	25
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_{nop} , Г	7,5	7,375	6,875	9,5	16,875	17,875	30,375	91,625	128,75
$V_{op,\kappa}$, см ³	3,57	3,512	3,274	4,524	8,036	8,512	14,464	43,631	61,31
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	3,57	7,08	10,36	14,88	22,92	31,43	45,89	89,52	150,83
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,21	0,478	0,801	1,317	2,258	3,272	4,919	9,832	15,998
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,42	0,478	0,4	0,439	0,452	0,467	0,4919	0,4916	0,533
\hat{d}_{cp}^o	0,906	1,03	0,864	0,947	0,974	1,008	1,061	1,06	1,15
r_{op} , мм	6,02	8,019	9,402	10,93	13,069	14,87	17,33	22,63	27,87
α	0,691	0,547	0,749	0,639	0,607	0,57	0,516	0,517	0,438
$4 \cdot \alpha$	2,762	2,187	2,995	2,554	2,429	2,279	2,066	2,068	1,7506
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,4	0,6	1	1,4	2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,751	1	0,719	0,837	1	1,138	1,326	1,732	2,132
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,454	1	0,373	0,634	1	1,342	1,791	3,114	3,764
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,908	1	0,933	1,057	1	0,959	0,895	0,779	0,627

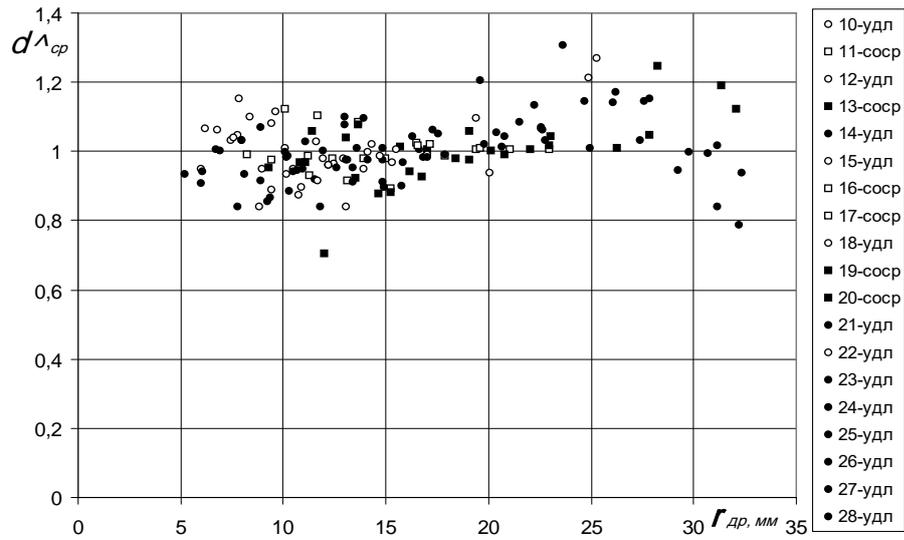


Рисунок 3.5 – Зависимость относительной величины среднего размера куска породы с удалением от оси заряда.

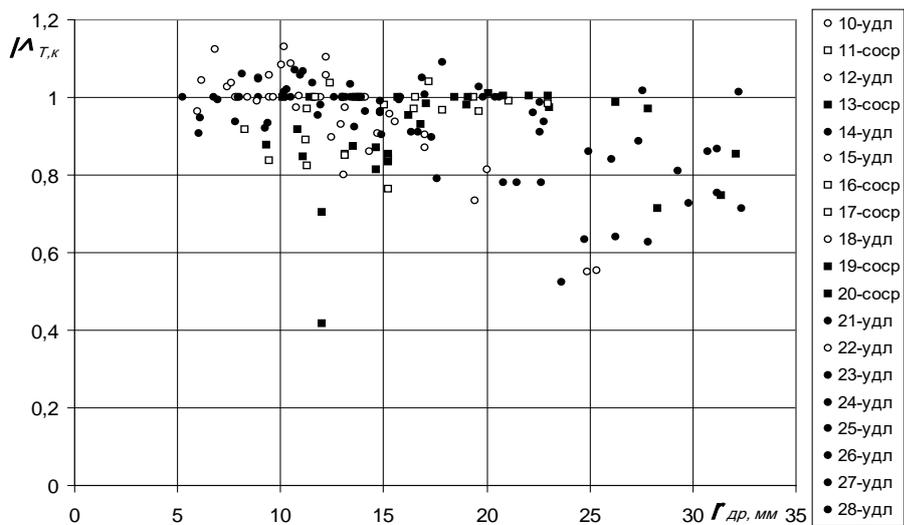


Рисунок 3.6 – Зависимость относительной величины максимального размера куска породы с удалением от оси заряда.

Таким образом, на зависимостях относительных величин среднего и максимального размеров куска породы с удалением от оси заряда установлено:

1. Существенно повышенный относительный выход мелких кусков ($d \leq 1$ мм) в 1-ой и 2-ой фракциях. Поэтому первую фракцию было решено в дальнейших исследованиях разделить, по крайней мере, на две фракции: от 0 до 0,25 мм и от 0,25 до 0,5 мм;

2. Несмотря на кажущуюся квазиоднородность и квазиизотропность силикатных блоков и смешивание раздробленных масс от четырех взрывов, т.е. значительное усреднение результатов, имеют место значительные различия (до 17%) содержания масс в одной и той же фракции при взрывном дроблении силикатных блоков. Особенно во фракциях с размером кусков более 10 мм, т.е. вблизи дополнительных поверхностей обнажения. Эти отклонения намного превышают погрешности разработанной методики взрывного нагружения и деформирования однородных и изотропных сред (например, свинца) и свидетельствуют о существенной вариабельности строения и локальности прочностных свойств силикатных блоков.

На этом постановочные опыты были завершены.

3.4.6 Общие замечания

В опытах был подтвержден известный факт о резком уменьшении объёма фракций $1 < d \leq 2$ мм по сравнению с объёмами фракций при $d < 1$ мм и при $d > 2$ мм, что свидетельствует о двух разных процессах разрушения породы. Частицы породы размером менее 1 мм получаются за счет интенсивного мелкодисперсного дробления блоков в ближней к заряду зоне. При этом процесс разрушения породы в этой зоне происходит как в результате развития индивидуальных трещин, так и за счет разрушения частиц в этой зоне при их переукладках (с трением друг о друга), приводящих к дилатансионному изменению общего объема этих частиц. Частицы же размером 2 мм и более формируются в основном в результате развития отдельных трещин. Этот факт обусловлен тем, что средний размер зерен силикатных блоков составляет 2 мм. То есть фракция $1 < d \leq 2$ мм является переходной от интенсивного мелкодисперсного дробления блоков к их разрушению отдельными трещинами.

3.4.7 Лабораторные исследования взрывного дробления полигалитовых пород (скв. №3 Шарлыкской площади)

Для проведения лабораторных экспериментальных исследований по взрывному дроблению полигалитовых пород разрушению были подвержены керны. Эти керны были диаметром от 61 до 72 мм длиной 150-170 мм – 17 шт. и четыре керна длиной 212, 236, 264 и 293 мм. Номера проб, число кернов и названия пород представлены в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Номера проб, число кернов и названия пород

№ проб	Число кернов	Название породы
1	4	Полигалит-ангидрит-галитовая порода
2	4	Ангидрит-галит-полигалитовая порода
3	4	Галит-ангидрит-полигалитовая порода
4	3	Ангидрит-полигалитовая порода
5	3	Галит
6	3	Ангидрит

Керны, практически все, кроме пробы №1, были достаточно однородны и имели ровные боковые цилиндрические поверхности, однако в них просматривались зерна длиной до $1,5 \div 2$ см. Керны пробы №1 имели неровные боковые поверхности с углублениями до $3 \div 4$ мм, образовавшихся, по-видимому, в результате растворения отдельных зерен галита. Сами зерна имели длину до $2 \div 2,5$ см и легко просматривались.

Для установления закономерностей взрывного дробления полигалитовых пород, учитывая длину кернов, было решено изготовить из этих кернов образцы длиной 60-80 мм с отторцованным и параллельными плоскостями на концах. Всего было изготовлено 48 образцов.

Первый опыт №1 (пробный) с полигалитовой породой взрывному разрушению подвергался один образец из керна 4/2. Размеры образца составляли: диаметр $a = 71$ мм, длина $b = 80$ мм, диаметр и длина шпура в нем были равны соответственно: $d_{unn} = 4$ мм и $l_{unn} = 60$ мм (рисунок 3.7).

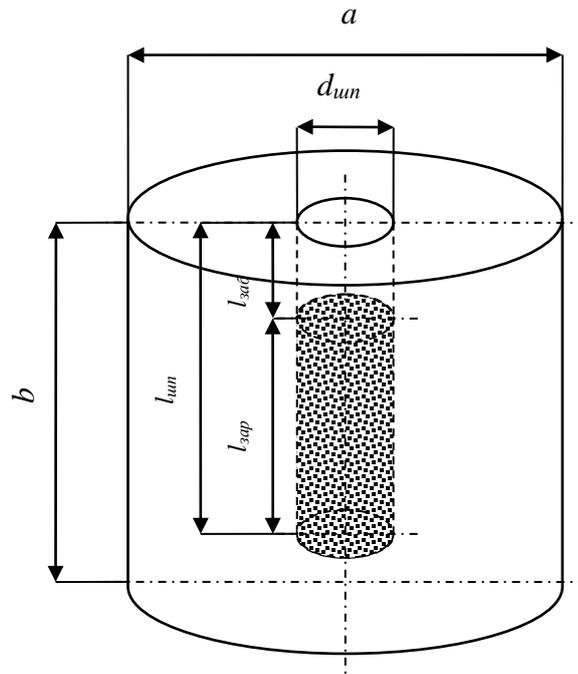


Рисунок 3.7 – Образец из полигалитовой породы.

В шпуре был размещен заряд ПС массой 0,45 г при $Q = 5024$ Дж/г, при этом длина заряда ПС составила $l_{зар} = 40$ мм. Опыт №1 показал, что на основе опыта предыдущих исследований взрывного дробления силикатных блоков параметры заряда для данной породы были выбраны оптимальные параметры, и было получено достаточно хорошее дробление породы. Опираясь на этот опыт №1 и сведения о полигалитовых породах была разработана последовательность проведения опытов, исходные данные которых представлены в таблицах 3.22 – 3.41. Подчеркнем, что все опыты проводились в полном соответствии с приведенной выше методикой лабораторных экспериментальных исследований (раздел 3.4 главы 3 настоящей диссертации) и были положены в основу при составлении Руководства по выполнению практических занятий по дисциплине: «Математические методы моделирования и расчеты на ЭВМ» и Руководства по выполнению лабораторных и практических занятий по дисциплине: «Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании» (Приложение 1 и 2). ПС изготовлялся в день проведения опытов и неиспользованные его остатки в конце проведения опытов за день уничтожались сжиганием.

В качестве ВВ также использовались заряды ПС с теми же Q_i длиной от 8 до 41 мм, диаметром от 3 до 5 мм и массой от 0,14 до 0,64 г. (таблицы 3.22 – 3.41).

Опыты проводились с образцами из полигалитовых пород цилиндрической формы в той же камере (рисунок 3.4, б).

Всего было проведено 19 серий опытов.

Таблица 3.22 – Данные по трем образцам опыта №2 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам			
	1	2	3	Опыт №2
Образец, мм	71×72	71×75,5	71×76	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	54,5	55	54,5	55
Длины зарядов, мм	34,5	37	35,5	35,633
Массы зарядов, г	0,39	0,42	0,4	0,403
Диаметр зарядов, мм	4	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	1200	1200	1200	1200
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав			
Способ инициирования зарядов	Электрический			
Слой	4/2			
Плотность породы, г/см ³	2,76			

Таблица 3.23 – Данные по двум образцам опыта №3 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам		
	1	2	Опыт №3
Образец, мм	71×82	71×82	-
Количество шпуров, шт	1	1	-
Длины шпуров, мм	61	61	61
Длины зарядов, мм	41	41	41
Массы зарядов, г	0,46	0,46	0,46
Диаметр зарядов, мм	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	800	800	800
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав		
Способ инициирования зарядов	Электрический		
Слой	4/3		
Плотность породы, г/см ³	2,83		

Таблица 3.24 – Данные по двум образцам опыта №4 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам		
	1	2	Опыт №4
Образец, мм	71×74	71×75	-
Количество шпуров, шт	1	1	-
Длины шпуров, мм	56	56	56
Длины зарядов, мм	36	36	36
Массы зарядов, г	0,64	0,64	0,64
Диаметр зарядов, мм	5	5	5
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	1200	1200	1200
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав		
Способ инициирования зарядов	Электрический		
Слой	4/1		
Плотность породы, г/см ³	2,75		

Таблица 3.25 – Данные по четырем образцам опыта №5 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам				
	1	2	3	4	Опыт №5
Образец, мм	61×81	63×74	61×75	65×85	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	59	54	55	63	57
Длины зарядов, мм	37	34	35	43	37,25
Массы зарядов, г	0,42	0,38	0,4	0,49	0,42
Диаметр зарядов, мм	4	4	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	1200	1200	1200	1200	1200
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав				
Способ инициирования зарядов	Электрический				
Слой	1/1	1/2	1/3	1/4	-
Плотность породы, г/см ³	2,21				

Таблица 3.26 – Данные по четырем образцам опыта №6 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам				
	1	2	3	4	Опыт №6
Образец, мм	64×78	64×72	62×79	65×79	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	58	52	59	59	57
Длины зарядов, мм	38	32	39	39	37
Массы зарядов, г	0,43	0,36	0,44	0,44	0,42
Диаметр зарядов, мм	4	4	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	800	800	800	800	800
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав				
Способ инициирования зарядов	Электрический				
Слой	1/1	1/2	1/3	1/4	-
Плотность породы, г/см ³	2,11				

Таблица 3.27 – Данные по трем образцам опыта №7 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам			
	1	2	3	Опыт №7
Образец, мм	70×80	68×79	70×73	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	59	59	55	57
Длины зарядов, мм	39	39	35	37,66
Массы зарядов, г	0,44	0,44	0,4	0,43
Диаметр зарядов, мм	4	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	1200	1200	1200	1200
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав			
Способ инициирования зарядов	Электрический			
Слой	2/4	2/2	2/3	-
Плотность породы, г/см ³	2,34			

Таблица 3.28 – Данные по трем образцам опыта №8 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам			
	1	2	3	Опыт №8
Образец, мм	70×72	70×74	70×78	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	50	54	59	54
Длины зарядов, мм	30	34	39	34,31
Массы зарядов, г	0,34	0,38	0,44	0,39
Диаметр зарядов, мм	4	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	800	800	800	800
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав			
Способ инициирования зарядов	Электрический			
Слой	2/4	2/3	2/1	-
Плотность породы, г/см ³	2,33			

Таблица 3.29 – Данные по трем образцам опыта №9 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам			
	1	2	3	Опыт №9
Образец, мм	70×67	68×84	70×79	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	47	66	58	57
Длины зарядов, мм	27	46	38	37
Массы зарядов, г	0,31	0,52	0,43	0,42
Диаметр зарядов, мм	4	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	600	600	600	600
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав			
Способ инициирования зарядов	Электрический			
Слой	2/3	2/2	2/1	-
Плотность породы, г/см ³	2,19			

Таблица 3.30 – Данные по двум образцам опыта №10 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам		
	1	2	Опыт №10
Образец, мм	70×68	71×67	-
Количество шпуров, шт	1	1	-
Длины шпуров, мм	44	45	45
Длины зарядов, мм	29	30	29,5
Массы зарядов, г	0,185	0,191	0,188
Диаметр зарядов, мм	3	3	3
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	1200	1200	1200
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав		
Способ инициирования зарядов	Электрический		
Слой	3/2		
Плотность породы, г/см ³	2,62		

Таблица 3.31 – Данные по двум образцам опыта №11 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам		
	1	2	Опыт №11
Образец, мм	71×67	71×75	
Количество шпуров, шт	1	1	
Длины шпуров, мм	44	45	45
Длины зарядов, мм	29	30	29,5
Массы зарядов, г	0,185	0,191	0,188
Диаметр зарядов, мм	3	3	3
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	1000	1000	1000
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав		
Способ инициирования зарядов	Электрический		
Слой	3/1		
Плотность породы, г/см ³	2,22		

Таблица 3.32 – Данные по двум образцам опыта №12 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам		
	1	2	Опыт №12
Образец, мм	71×65	71×68	
Количество шпуров, шт	1	1	
Длины шпуров, мм	45	45	45
Длины зарядов, мм	30	30	30
Массы зарядов, г	0,191	0,191	0,191
Диаметр зарядов, мм	3	3	3
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	800	800	800
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав		
Способ инициирования зарядов	Электрический		
Слой	3/4		
Плотность породы, г/см ³	2,45		

Таблица 3.33 – Данные по двум образцам опыта №13 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам		
	1	2	Опыт №13
Образец, мм	71×67	71×65	-
Количество шпуров, шт	1	1	-
Длины шпуров, мм	45	45	45
Длины зарядов, мм	30	30	30
Массы зарядов, г	0,191	0,191	0,191
Диаметр зарядов, мм	3	3	3
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	600	600	600
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав		
Способ инициирования зарядов	Электрический		
Слой	3/3		
Плотность породы, г/см ³	2,35		

Таблица 3.34 – Данные по трем образцам опыта №14 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам			
	1	2	3	Опыт №14
Образец, мм	71,5×80	71,5×81,5	72×80,5	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	60	59,5	60	60
Длины зарядов, мм	40	39,5	40	39,8
Массы зарядов, г	0,452	0,452	0,452	0,452
Диаметр зарядов, мм	4	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	800	800	800	800
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав			
Способ инициирования зарядов	Электрический			
Слой	6/1			
Плотность породы, г/см ³	2,86			

Таблица 3.35 – Данные по двум образцам опыта №15 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам		
	1	2	Опыт №15
Образец, мм	71×83	70,5×83,5	-
Количество шпуров, шт	1	1	-
Длины шпуров, мм	60	60	60
Длины зарядов, мм	40	40	40
Массы зарядов, г	0,452	0,452	0,452
Диаметр зарядов, мм	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	1000	1000	1000
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав		
Способ инициирования зарядов	Электрический		
Слой	6/3		
Плотность породы, г/см ³	2,87		

Таблица 3.36 – Данные по двум образцам опыта №16 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам		
	1	2	Опыт №16
Образец, мм	71,5×80,5	71,5×83	-
Количество шпуров, шт	1	1	-
Длины шпуров, мм	60	62	61
Длины зарядов, мм	40	42	41
Массы зарядов, г	0,452	0,475	0,464
Диаметр зарядов, мм	4	4	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	1200	1200	1200
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав		
Способ инициирования зарядов	Электрический		
Слой	6/2		
Плотность породы, г/см ³	2,84		

Таблица 3.37 – Данные по образцу опыта №17 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцу
	Опыт №17
Образец, мм	70×67
Количество шпуров, шт	1
Длины шпуров, мм	36
Длины зарядов, мм	10
Массы зарядов, г	0,45
Диаметр зарядов, мм	8
Плотность ВВ, г/см ³	0,9
Теплота, кал/г	1200
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав
Способ инициирования зарядов	Электрический
Слой	5/1
Плотность породы, г/см ³	2,08

Таблица 3.38 – Данные по образцу опыта №18 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцу
	Опыт №18
Образец, мм	69×73
Количество шпуров, шт	1
Длины шпуров, мм	56
Длины зарядов, мм	40
Массы зарядов, г	0,45
Диаметр зарядов, мм	4
Плотность ВВ, г/см ³	0,9
Теплота, кал/г	800
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав
Способ инициирования зарядов	Электрический
Слой	5/2
Плотность породы, г/см ³	2,14

Таблица 3.39 – Данные по трем образцам опыта №19 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам			
	1	2	3	Опыт №19
Образец, мм	69×68	69×71	69×76	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	42	43	43	43
Длины зарядов, мм	22	23	23	22,6
Массы зарядов, г	0,14	0,146	0,146	0,144
Диаметр зарядов, мм	3	3	3	3
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	600	600	600	600
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав			
Способ инициирования зарядов	Электрический			
Слой	5/1	5/3	5/3	-
Плотность породы, г/см ³	2,14			

Таблица 3.40 – Данные по трем образцам опыта №20 (полигалитовая порода)

Показатели	Данные по образцам			
	1	2	3	Опыт №20
Образец, мм	69×72	69×68	69×70	-
Количество шпуров, шт	1	1	1	-
Длины шпуров, мм	40	40	40	40
Длины зарядов, мм	8	8	8	8
Массы зарядов, г	0,141	0,141	0,141	0,141
Диаметр зарядов, мм	5	5	5	5
Плотность ВВ, г/см ³	0,9	0,9	0,9	0,9
Теплота, кал/г	600	600	600	600
Взрывчатое вещество	Пиротехнический состав			
Способ инициирования зарядов	Электрический			
Слой	5/2			
Плотность породы, г/см ³	2,16			

В таблице 3.41 в скобках в втором столбце указаны число образцов взорванных в каждой серии опытов. Причем впоследствии массы фракций делились на число взорванных образцов, то есть находились осредненные значения масс фракций, приходящиеся на взрывное дробление одного образца. Результаты всех 19 серий опытов взрывного дробления полигалитовых пород представлены в таблице 3.42.

Таблица 3.41 – Данные проведения 19 серий опытов

№ опыта	№ керна (кол-во образцов)	Размеры образцов масса, г	$\rho_{пор}$, г/см ³	$d_{зар}$, мм	$m_{зар}$, г	Q , Дж/г	$l_{ун}$, мм	$l_{зар}$, мм	$\rho_{вв}$, г/см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	4/2 (3)	$\frac{71 \times 72 - 76}{2438,5}$	2,76	4	0,4	5024	55	35,6	0,9
3	4/3 (2)	$\frac{71 \times 82}{1836,5}$	2,83	4	0,46	3350	61	41	0,9
4	4/1 (2)	$\frac{71 \times 74 - 75}{1622,65}$	2,75	5	0,64	5024	56	36	0,9
5	1/1-4 (4)	$\frac{61 \times 74 - 85}{2146,6}$	2,21	4	0,42	5024	57	37	0,9
6	1/1-4 (4)	$\frac{64 \times 72 - 79}{2073,3}$	2,11	4	0,42	3350	57	37	0,9
7	2/2-4 (3)	$\frac{70 \times 73 - 80}{2048,2}$	2,34	4	0,43	5024	57	37	0,9
8	2/1,3-4 (3)	$\frac{70 \times 72 - 78}{1941,43}$	2,33	4	0,39	3350	54	34	0,9
9	2/1-3 (3)	$\frac{70 \times 67 - 84}{1903,35}$	2,19	4	0,42	2512	57	37	0,9
10	3/2 (2)	$\frac{70 \times 67 - 68}{1379,2}$	2,62	3	0,19	5024	45	30	0,9
11	3/1 (2)	$\frac{71 \times 67 - 75}{1246,8}$	2,22	3	0,19	4187	45	30	0,9
12	3/4 (2)	$\frac{71 \times 65 - 68}{1287,9}$	2,45	3	0,19	4187	45	30	0,9
13	3/3 (2)	$\frac{71 \times 65 - 67}{1231,2}$	2,35	3	0,19	4187	45	30	0,9
14	6/1 (3)	$\frac{72 \times 80 - 82}{2791,1}$	2,86	4	0,45	4187	60	40	0,9
15	6/3 (2)	$\frac{71 \times 83}{1877,05}$	2,87	4	0,45	4187	60	40	0,9
16	6/2 (2)	$\frac{71,5 \times 80 - 83}{1861,6}$	2,84	4	0,46	4187	61	41	0,9
17*	5/1 (1)	$\frac{70 \times 67}{536,7}$	2,08	8	0,45	4187	36	10	0,9
18	5/2 (1)	$\frac{69 \times 73}{583,5}$	2,14	4	0,45	3350	56	40	0,9
19	5/1,3 (3)	$\frac{69 \times 68 - 76}{1719,5}$	2,14	3	0,14	2512	43	23	0,9
20*	5/2 (3)	$\frac{69 \times 68 - 72}{1693,8}$	2,16	5	0,14	2512	40	8	0,9

* - заряд сосредоточенный, все остальные заряды удлиненные.

Таблица 3.42 – Результаты 19 серий опытов (полигалитовая порода)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max} , мм	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25
2 опыт											
$m_{пор}$, Г	4,77	4,23	2,5	18	12,7	40,6	44,4	71,82	175	98,6	341,45
3 опыт											
$m_{пор}$, Г	2,98	2,575	1,925	13,18	8,63	24,8	24,8	42,9	103,55	161	529,95
4 опыт											
$m_{пор}$, Г	5,68	6,01	3,3	28,65	18,2	53,3	57,5	85	187,91	163	200,13
5 опыт											
$m_{пор}$, Г	2,28	6,425	1,2	96,75	37,1	96,1	74,5	85,88	97,675	22,61	15,013
6 опыт											
$m_{пор}$, Г	2,15	5,025	0,7	63,13	25,7	70,4	64,2	94,5	100,55	37,7	52,8
7 опыт											
$m_{пор}$, Г	5,63	4,3	0,867	68,07	27,0	76	74,0	117,9	192,1	42,13	71,667
8 опыт											
$m_{пор}$, Г	4,67	4,4	0,6	46	17,7	47	43,9	75,83	177,67	110,3	117,5
9 опыт											
$m_{пор}$, Г	3,47	4,983	0,9	41,23	17,2	46,1	43,2	74,67	149,45	63,57	188,67
10 опыт											
$m_{пор}$, Г	2,95	3,05	1,5	13,3	8,5	26,6	24,7	45,85	137,3	163,3	262
11 опыт											
$m_{пор}$, Г	3,75	4,1	1,4	14,15	8,95	22	24,4	45,55	125,75	65,1	306,65
12 опыт											
$m_{пор}$, Г	2,8	3,55	1,2	12,6	6,75	18,4	21,3	31,65	92,75	68,9	383,5
13 опыт											
$m_{пор}$, Г	1,7	2,2	0,75	9,55	4,3	13,8	14,6	24,4	67	66,2	410,5
14 опыт											
$m_{пор}$, Г	4,93	4,2	2,533	17,33	10,2	28,5	30,4	63,87	149,5	210,1	405,77
15 опыт											
$m_{пор}$, Г	2,48	3,85	2,15	15,9	10,6	31,9	37,4	68,3	202,6	145,9	410,85
16 опыт											
$m_{пор}$, Г	6,9	5,5	3,4	26,7	20,1	63,5	69,2	108,5	220,1	203,2	200,6
17 опыт											
$m_{пор}$, Г	3,8	11,3	4,5	76,85	54	150	103	78,6	45,9	8,8	-
18 опыт											
$m_{пор}$, Г	5,05	17,6	4,65	99,25	59,1	150	91,9	77,05	65,1	13,2	-
19 опыт											
$m_{пор}$, Г	0,83	3,383	1,5	19,88	14,7	49,7	46,7	68,87	143,15	110,9	112,32
20 опыт											
$m_{пор}$, Г	0,5	2,167	1,167	13,68	11,1	41,9	43,3	57,83	127,23	131,2	133,65

3.4.8 Анализ взрывного дробления образцов из полигалитовой породы (скв. №3 Шарлыкской площади)

При анализе результатов опытов с образцами из полигалитовой породы использовалась та же модель, что и выше (рисунок 3.1 и (3.16)) приведённая в разделе 3.2 главы 3 настоящей диссертации.

При анализе опытных данных также использовались теоретические соотношения (3.24) – (3.37), при том, что в данных опытах взрывного дробления образцов из полигалитовых пород опорное значение в зоне мелкодисперсного дробления принималось $l_{оп,э,1}^{max} = 0,5$ мм, а в зоне трещинообразования $l_{оп,э,2}^{max} = 5$ мм.

В таблицах 3.43 – 3.61 приводятся результаты расчетов по опытным данным взрывного дробления образцов из полигалитовой породы (скв. №3 Шарлыкской площади) с 2 по 20 опыт.

Результаты обработки опытных данных со всеми образцами из полигалитовых пород представлены на рисунках 3.8 и 3.9. По оси абсцисс отложены значения $r_{др}$ – радиусов зоны дробления. Очевидно, он не может быть больше 35-36 мм, поскольку керны имели диаметр 61-72 мм.

Как видно на рисунках 3.5 – 3.6 и 3.8 – 3.9, получилось удовлетворительное согласование теоретической модели с результатами взрывного дробления двух разных по свойствам пород.

Таблица 3.43 – Результаты расчетов опыта №2 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , ММ	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , ММ	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	4,77	4,23	2,5	18	12,68	40,64	44,37	71,82	175	98,6	341,5
$V_{dp,\kappa}$, см ³	1,73	1,54	0,91	6,53	4,6	14,75	16,1	26,06	63,5	35,8	123,9
$V_{dp,i}^{\Sigma}$, см ³	1,73	3,27	0,91	7,44	12,04	26,79	42,88	68,94	132,44	168,	292,1
d_{Σ}^{cp} , ММ	0,12	0,24	0,75	1,41	1,83	3,02	4,14	5,79	9,25	11,1	17
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,48	0,75	0,7	0,61	0,61	0,59	0,58	0,58	0,56	0,57
\hat{d}_{cp}^o	1	1	1,22	1,15	0,99	0,98	0,96	0,94	0,94	0,9	0,92
r_{dp} , ММ	4,15	5,31	3,33	7,46	9,16	12,9	15,66	19,06	24,83	27,3	34,17
α	0,54	0,54	0,17	0,21	0,32	0,33	0,35	0,36	0,37	0,4	0,38
$4 \cdot \alpha$	2,17	2,17	0,67	0,84	1,29	1,31	1,38	1,46	1,46	1,6	1,53
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{dp} , ММ	0,78	1	0,26	0,58	0,71	1	1,22	1,48	1,93	2,13	2,66
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,59	1	0,41	0,63	0,65	1	1,31	1,77	2,62	3,34	4,46
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,18	1	2,03	1,58	1,08	1	0,94	0,89	0,82	0,84	0,74

Таблица 3.44 – Результаты расчетов опыта №3 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	2,975	2,575	1,925	13,175	8,625	24,8	24,8	42,9	103,55	160,975	529,95
$V_{op,\kappa}$, см ³	1,052	0,91	0,68	4,66	3,049	8,768	8,768	15,167	36,61	56,91	187,36
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	1,052	1,96	0,68	5,34	8,388	17,156	25,92	41,09	77,7	134,61	321,97
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,238	0,75	1,404	1,803	2,926	3,965	5,639	9,107	12,867	19,927
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,4766	0,75	0,702	0,601	0,585	0,566	0,5639	0,569	0,643	0,664
\hat{d}_{cp}^o	1,0035	0,996	1,196	1,119	0,958	0,9328	0,903	0,899	0,907	1,0256	1,0589
r_{op} , мм	3,3559	4,1588	2,9549	6,19	7,493	10,187	12,174	14,8047	19,338	24,2459	34,43
α	0,542	0,549	0,1667	0,212	0,332	0,3545	0,3826	0,3866	0,378	0,277	0,2527
$4 \cdot \alpha$	2,1667	2,196	0,667	0,848	1,328	1,418	1,53	1,547	1,5136	1,1087	1,0109
$\bar{l}_{\vartheta,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,8069	1	0,2901	0,608	0,7355	1	1,195	1,453	1,898	2,38	3,3797
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,628	1	0,438	0,655	0,665	1	1,313	1,7826	2,638	2,615	3,4249
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,257	1	2,1909	1,638	1,108	1	0,938	0,891	0,824	0,6538	0,5708

Таблица 3.45 – Результаты расчетов опыта №4 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	5,675	6,01	3,3	28,65	18,225	53,275	57,525	85	187,91	162,975	200,125
$V_{op,\kappa}$, см ³	2,063	2,185	1,1998	10,416	6,626	19,369	20,914	30,903	68,318	59,25	72,759
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	2,063	4,248	1,1998	11,616	18,242	37,611	58,526	89,429	157,748	217,0005	289,76
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,251	0,75	1,4225	1,8139	2,9397	4,033	5,577	8,792	11,306	14,7447
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,502	0,75	0,711	0,6046	0,5879	0,576	0,558	0,549	0,565	0,491
\hat{d}_{cp}^o	0,977	1,0227	1,251	1,187	1,0088	0,98099	0,961	0,9305	0,9168	0,943	0,82006
r_{op} , мм	4,645	6,053	3,913	9,093	10,976	14,842	17,815	21,181	26,604	30,213	33,989
α	0,5417	0,495	0,1667	0,203	0,3269	0,3504	0,368	0,397	0,4099	0,384	0,517
$4 \cdot \alpha$	2,1667	1,982	0,667	0,812	1,308	1,4017	1,471	1,586	1,63979	1,5379	2,069
\bar{l}_{κ}^{\max}	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,767	1	0,264	0,613	0,7395	1	1,2003	1,427	1,792	2,036	2,29
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,564	1	0,411	0,672	0,6739	1	1,308	1,758	2,604	2,9838	5,554
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,127	1	2,0559	1,679	1,123	1	0,934	0,879	0,814	0,746	0,926

Таблица 3.46 – Результаты расчетов опыта №5 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , ММ	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , ММ	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	2,275	6,425	1,2	96,75	37,05	96,125	74,5	85,875	97,675	22,6125	15,0125
$V_{op,\kappa}$, см ³	1,0306	2,91	0,5436	43,83	16,7846	43,547	33,75	38,904	44,249	10,244	6,801
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	1,0306	3,94	0,5436	44,374	61,159	104,7058	138,456	177,36	221,609	231,853	238,6545
d_{Σ}^{cp} , ММ	0,12	0,3083	0,75	1,4908	1,7678	2,696	3,5015	4,5979	6,276	6,7936	7,312
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,6166	0,75	0,745	0,589	0,539	0,5002	0,4598	0,392	0,3397	0,2437
\hat{d}_{cp}^o	0,8754	1,125	1,4804	1,471	1,163	1,064	0,987	0,908	0,774	0,67049	0,481
r_{op} , ММ	3,425	5,643	2,85	15,698	17,9405	22,37	25,044	27,656	30,2306	30,783	31,142
α	0,5417	0,3108	0,1667	0,1708	0,3485	0,427	0,4996	0,587	0,7748	0,972	1,551
$4 \cdot \alpha$	2,1667	1,243	0,667	0,683	1,394	1,709	1,998	2,3498	3,099	3,888	6,205
\bar{l}_{κ}^{\max}	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{op} , ММ	0,607	1	0,127	0,7017	0,802	1	1,1196	1,236	1,351	1,376	1,392
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,339	1	0,253	0,785	0,735	1	1,253	1,646	2,543	3,4598	7,791
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,678	1	1,266	1,963	1,225	1	0,895	0,823	0,7946	0,8649	1,2985

Таблица 3.47 – Результаты расчетов опыта №6 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , ММ	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , ММ	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	2,15	5,025	0,7	63,125	25,725	70,425	64,2375	94,5	100,55	37,7	52,8
$V_{op,\kappa}$, см ³	1,02	2,38	0,332	29,958	12,209	33,422	30,486	44,848	47,719	17,892	25,058
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	1,02	3,405	0,332	30,29	42,499	75,92	106,407	151,255	198,974	216,865	241,923
d_{Σ}^{cp} , ММ	0,12	0,2986	0,75	1,492	1,781	2,758	3,6869	5,114	7,005	7,912	9,682
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,597	0,75	0,746	0,5938	0,5516	0,5267	0,511	0,4378	0,3956	0,323
\hat{d}_{cp}^o	0,891	1,109	1,396	1,388	1,105	1,027	0,9803	0,9518	0,8149	0,736	0,6007
r_{op} , ММ	3,421	5,3296	2,556	13,3948	15,444	19,6465	22,5502	25,985	28,995	30,01	31,357
α	0,5417	0,337	0,1667	0,1703	0,342	0,406	0,449	0,4777	0,642	0,7638	1,049
$4 \cdot \alpha$	2,1667	1,349	0,667	0,681	1,368	1,626	1,797	1,9108	2,568	3,055	4,197
\bar{l}_{κ}^{\max}	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{op} , ММ	0,642	1	0,13	0,682	0,786	1	1,148	1,3226	1,476	1,528	1,596
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,3826	1	0,2567	0,7703	0,719	1	1,281	1,706	2,717	3,649	7,115
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,765	1	1,284	1,926	1,199	1	0,915	0,853	0,849	0,912	1,186

Таблица 3.48 – Результаты расчетов опыта №7 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , г	5,633	4,3	0,867	68,067	27,033	76	74,033	117,867	192,1	42,133	71,667
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	2,412	1,841	0,371	29,138	11,572	32,534	31,692	50,457	82,235	18,037	30,679
$V_{\partial p, i}^{\Sigma}$, см ³	2,412	4,252	0,371	29,509	41,082	73,616	105,308	155,765	237,999	256,036	286,715
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,23	0,75	1,491	1,775	2,758	3,734	5,278	7,946	8,654	10,403
$\bar{d}_{cp, \Sigma}$	0,48	0,461	0,75	0,745	0,592	0,552	0,533	0,528	0,497	0,433	0,347
\hat{d}_{cp}^o	1,0204	0,9796	1,3565	1,348	1,0701	0,998	0,965	0,955	0,898	0,783	0,627
$r_{\partial p}$, мм	4,6228	5,79997	2,605	13,181	15,154	19,316	22,367	26,197	31,038	31,962	33,4598
α	0,5417	0,585	0,1667	0,171	0,345	0,406	0,437	0,447	0,507	0,6555	0,942
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,341	0,667	0,684	1,38	1,625	1,749	1,789	2,027	2,622	3,767
$\bar{l}_{\partial, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
$\bar{r}_{\partial p}$, мм	0,797	1	0,135	0,682	0,785	1	1,158	1,356	1,607	1,655	1,732
$\bar{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,6117	1	0,263	0,7701	0,715	1	1,292	1,725	2,615	3,745	7,923
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	1,223	1	1,3149	1,925	1,192	1	0,923	0,863	0,817	0,936	1,3205

Таблица 3.49 – Результаты расчетов опыта №8 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	4,667	4,4	0,6	46	17,65	47	43,933	75,833	177,667	110,3	117,5
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	2,003	1,889	0,258	19,745	7,576	20,174	18,858	32,55	76,261	47,345	50,435
$V_{\partial p, i}^{\Sigma}$, см ³	2,003	3,892	0,258	20,002	27,578	47,752	66,61	99,16	175,4209	222,765	273,2
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,244	0,75	1,49	1,768	2,711	3,642	5,237	8,612	10,607	13,264
$\bar{d}_{cp, \Sigma}$	0,48	0,488	0,75	0,745	0,589	0,542	0,5203	0,524	0,538	0,5303	0,442
\hat{d}_{cp}^o	0,992	1,008	1,303	1,294	1,0235	0,9418	0,904	0,9096	0,9349	0,9212	0,768
$r_{\partial p}$, мм	4,438	5,771	2,468	11,4887	13,1525	16,533	18,958	22,282	27,997	30,83	33,562
α	0,5417	0,5256	0,1667	0,171	0,3486	0,422	0,461	0,455	0,429	0,443	0,631
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,103	0,667	0,684	1,394	1,689	1,844	1,819	1,716	1,771	2,524
$\bar{l}_{\partial, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
$\bar{r}_{\partial p}$, мм	0,769	1	0,149	0,695	0,796	1	1,147	1,348	1,693	1,865	2,0299
$\bar{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,566	1	0,281	0,7796	0,727	1	1,287	1,721	2,469	3,015	5,9696
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	1,132	1	1,407	1,949	1,212	1	0,919	0,86	0,772	0,754	0,9949

Таблица 3.50 – Результаты расчетов опыта №9 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , ММ	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , ММ	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	3,467	4,983	0,9	41,233	17,233	46,133	43,233	74,667	149,45	63,567	188,667
$V_{op,\kappa}$, см ³	1,58	2,272	0,41	18,796	7,856	21,03	19,708	34,037	68,127	28,977	86,004
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	1,58	3,852	0,41	19,207	27,062	48,092	67,8	101,837	169,964	198,941	284,945
d_{Σ}^{cp} , ММ	0,12	0,2704	0,75	1,484	1,7789	2,75	3,6948	5,301	8,387	9,787	14,379
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,5408	0,75	0,742	0,593	0,55003	0,5278	0,5301	0,524	0,489	0,479
\hat{d}_{cp}^o	0,9405	1,0595	1,3016	1,2877	1,0291	0,9546	0,916	0,91998	0,9097	0,849	0,8318
r_{op} , ММ	3,9705	5,603	2,6704	11,0414	12,7719	16,263	18,753	22,152	27,227	28,994	33,509
α	0,5417	0,4246	0,1667	0,1739	0,3432	0,409	0,447	0,443	0,4539	0,5218	0,5432
$4 \cdot \alpha$	2,167	1,698	0,667	0,695	1,373	1,636	1,789	1,773	1,815	2,087	2,173
$\bar{l}_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{op} , ММ	0,7086	1	0,1642	0,6789	0,785	1	1,153	1,362	1,674	1,783	2,0604
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,474	1	0,2999	0,7639	0,718	1	1,29	1,7296	2,548	3,342	4,8104
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,948	1	1,499	1,9098	1,1961	1	0,9216	0,8648	0,796	0,8356	0,8017

Таблица 3.51 – Результаты расчетов опыта №10 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$m_{\text{нор}}$, Г	2,95	3,05	1,5	13,3	8,5	26,6	24,7	45,85	137,3	163,25	262
$V_{\text{оп},\kappa}$, см ³	1,127	1,165	0,573	5,081	3,247	10,162	9,436	17,517	52,455	62,369	100,096
$V_{\text{оп},i}^{\Sigma}$, см ³	1,127	2,292	0,573	5,654	8,902	19,064	28,5	46,017	98,472	160,84	260,936
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,2496	0,75	1,424	1,8165	2,9805	3,9802	5,701	9,5889	12,85	17,511
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,499	0,75	0,712	0,6055	0,596	0,5686	0,5701	0,5993	0,6425	0,5837
\hat{d}_{cp}^o	0,9803	1,0197	1,1994	1,1386	0,9683	0,9533	0,9093	0,9117	0,9584	1,0275	0,933
$r_{\text{оп}}$, мм	3,5559	4,7443	2,7713	6,9646	8,4596	11,689	13,8296	16,848	22,894	27,929	34,797
α	0,5417	0,5015	0,1667	0,2023	0,3258	0,3388	0,3793	0,3771	0,3343	0,278	0,3566
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,006	0,667	0,809	1,303	1,355	1,517	1,508	1,337	1,113	1,426
$\bar{l}_{\text{оп},\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
$\bar{r}_{\text{оп}}$, мм	0,7495	1	0,237	0,5958	0,7237	1	1,183	1,441	1,959	2,389	2,977
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,5354	1	0,383	0,658	0,656	1	1,2906	1,7357	2,457	2,636	4,74
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,0708	1	1,915	1,644	1,0936	1	0,9219	0,8678	0,7677	0,6589	0,79

Таблица 3.52 – Результаты расчетов опыта №11 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	3,75	4,1	1,4	14,15	8,95	22	24,4	45,55	125,75	65,1	306,65
$V_{op,\kappa}$, см ³	1,687	1,844	0,63	6,364	4,025	9,894	10,974	20,486	56,555	29,278	137,913
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	1,687	3,53	0,63	6,993	11,019	20,913	31,887	52,372	108,927	138,206	276,119
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,253	0,75	1,432	1,822	2,853	3,936	5,721	9,5	11,3	18,143
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,506	0,75	0,716	0,607	0,5705	0,562	0,572	0,594	0,565	0,605
\hat{d}_{cp}^o	0,973	1,0267	1,2179	1,163	0,986	0,926	0,913	0,929	0,964	0,918	0,982
r_{op} , мм	4,1786	5,6939	2,863	7,629	9,267	12,153	14,489	17,76	23,836	26,237	35,831
α	0,5417	0,4874	0,1667	0,198	0,323	0,376	0,389	0,374	0,342	0,385	0,327
$4 \cdot \alpha$	2,167	1,95	0,67	0,79	1,29	1,51	1,557	1,496	1,368	1,5395	1,307
$\bar{l}_{\vartheta,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,734	1	0,236	0,628	0,763	1	1,192	1,461	1,961	2,1589	2,948
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,511	1	0,381	0,691	0,704	1	1,315	1,764	2,514	3,27	4,109
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,023	1	1,907	1,729	1,174	1	0,939	0,8819	0,7856	0,8175	0,6849

Таблица 3.53 – Результаты расчетов опыта №12 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	2,8	3,55	1,2	12,6	6,75	18,4	21,3	31,65	92,75	68,9	383,5
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	1,145	1,45	0,49	5,153	2,76	7,526	8,712	12,945	37,935	28,18	156,85
$V_{\partial p, i}^{\Sigma}$, см ³	1,145	2,597	0,49	5,64	8,41	15,93	24,64	37,59	75,52	103,7	260,55
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,263	0,75	1,435	1,785	2,831	3,951	5,518	9,276	11,647	19,685
$\bar{d}_{cp, \Sigma}$	0,48	0,525	0,75	0,717	0,595	0,5662	0,5645	0,5518	0,5798	0,582	0,656
\hat{d}_{cp}°	0,9551	1,0449	1,2134	1,1606	0,9624	0,91606	0,91324	0,8927	0,9379	0,9421	1,0616
$r_{\partial p}$, мм	3,558	4,9706	2,618	6,921	8,2108	10,7846	12,959	15,443	20,516	23,2926	34,477
α	0,5417	0,452	0,1667	0,19697	0,34049	0,383	0,38575	0,40613	0,3624	0,3586	0,262
$4 \cdot \alpha$	2,167	1,81	0,667	0,788	1,362	1,532	1,543	1,625	1,45	1,43	1,05
$\bar{l}_{\Sigma, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
$\bar{r}_{\partial p}$, мм	0,7158	1	0,243	0,6417	0,7613	1	1,2016	1,4319	1,9023	2,16	3,197
$\bar{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,4846	1	0,389	0,705	0,6898	1	1,3277	1,7918	2,54	3,0178	3,3801
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,9692	1	1,9457	1,7626	1,1497	1	0,9483	0,8959	0,7938	0,7544	0,5633

Таблица 3.54 – Результаты расчетов опыта №13 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	1,7	2,2	0,75	9,55	4,3	13,75	14,6	24,4	67	66,2	410,5
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	0,722	0,935	0,319	4,058	1,827	5,842	6,204	10,368	28,468	28,128	174,421
$V_{\partial p, i}^{\Sigma}$, см ³	0,722	1,657	0,319	4,376	6,204	12,046	18,249	28,617	57,085	85,214	259,63
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,2638	0,75	1,445	1,756	2,844	3,917	5,577	9,279	12,158	20,785
$\bar{d}_{cp, \Sigma}$	0,48	0,528	0,75	0,723	0,585	0,569	0,5596	0,5577	0,5799	0,6079	0,6928
\hat{d}_{cp}°	0,9527	1,047	1,20003	1,1563	0,9365	0,9102	0,8953	0,8924	0,9279	0,9726	1,1086
$r_{\partial p}$, мм	2,991	4,1247	2,2945	6,2056	7,2075	9,5768	11,4249	13,7932	18,3234	21,534	34,417
α	0,5417	0,4475	0,1667	0,1919	0,3542	0,3789	0,3935	0,396	0,362	0,3225	0,22167
$4 \cdot \alpha$	2,167	1,79	0,667	0,767	1,417	1,516	1,574	1,5859	1,4486	1,29008	0,887
$\bar{l}_{\Sigma, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
$\bar{r}_{\partial p}$, мм	0,725	1	0,2396	0,648	0,7526	1	1,193	1,44	1,9133	2,2485	3,594
$\bar{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,498	1	0,3858	0,717	0,6685	1	1,32	1,7835	2,5598	2,8443	3,109
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,9967	1	1,929	1,792	1,114	1	0,943	0,892	0,7999	0,711	0,518

Таблица 3.55 – Результаты расчетов опыта №14 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	4,933	4,2	2,533	17,333	10,167	28,533	30,433	63,867	149,5	210,1	405,767
$V_{op,\kappa}$, см ³	1,726	1,469	0,886	6,063	3,556	9,98	10,645	22,339	52,291	73,487	141,926
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	1,726	3,195	0,886	6,949	10,505	20,485	31,13	53,469	105,76	179,247	321,173
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,237	0,75	1,404	1,775	2,859	3,933	5,841	9,381	12,914	18,255
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,475	0,75	0,702	0,592	0,572	0,562	0,584	0,586	0,6457	0,6085
\hat{d}_{cp}^o	1,0057	0,9943	1,2049	1,128	0,9506	0,9186	0,9027	0,9384	0,9419	1,0373	0,9776
r_{op} , мм	4,005	5,0677	3,209	6,987	8,332	11,096	13,274	16,673	22,12	27,397	34,61
α	0,5417	0,5537	0,1667	0,2121	0,345	0,3744	0,3899	0,356	0,3528	0,2743	0,3217
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,215	0,667	0,848	1,38	1,498	1,559	1,424	1,411	1,097	1,287
$\bar{l}_{\sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{op} , мм	0,7903	1	0,2892	0,6297	0,7509	1	1,1963	1,5026	1,9935	2,469	3,119
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,6006	1	0,4373	0,6755	0,6735	1	1,3224	1,7858	2,6475	2,696	4,322
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,2012	1	2,1866	1,6886	1,1225	1	0,9446	0,8929	0,8273	0,674	0,7204

Таблица 3.56 – Результаты расчетов опыта №15 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	2,475	3,85	2,15	15,9	10,55	31,9	37,4	68,3	202,6	145,9	410,85
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	0,863	1,342	0,75	5,544	3,679	11,123	13,04	23,815	70,642	50,872	143,253
$V_{\partial p, i}^{\Sigma}$, см ³	0,863	2,205	0,75	6,294	9,972	21,095	34,135	57,95	128,591	179,463	322,716
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,275	0,75	1,411	1,813	2,966	4,125	5,923	9,811	12,132	17,844
$\bar{d}_{cp, \Sigma}$	0,48	0,5504	0,75	0,7053	0,604	0,5932	0,5893	0,5923	0,6132	0,6066	0,5948
\hat{d}_{cp}^o	0,9316	1,0684	1,1949	1,1238	0,9626	0,9451	0,9389	0,9437	0,9769	0,9665	0,9477
$r_{\partial p}$, мм	3,1799	4,3797	3,053	6,69	8,1362	11,2202	13,7841	17,223	23,9318	27,3836	34,643
α	0,5417	0,4084	0,1667	0,2089	0,3276	0,3429	0,3485	0,3442	0,3154	0,3243	0,3406
$4 \cdot \alpha$	2,167	1,633	0,667	0,836	1,3103	1,372	1,394	1,377	1,262	1,297	1,3624
$\bar{l}_{\partial, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
$\bar{r}_{\partial p}$, мм	0,7261	1	0,2721	0,5962	0,7251	1	1,2285	1,535	2,1329	2,441	3,088
$\bar{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,4998	1	0,4199	0,6492	0,6563	1	1,3323	1,8039	2,6007	3,181	4,646
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,9995	1	2,0995	1,6229	1,0938	1	0,9516	0,902	0,8127	0,7953	0,7743

Таблица 3.57 – Результаты расчетов опыта №16 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	6,9	5,5	3,4	26,7	20,05	63,45	69,15	108,5	220,1	203,15	200,6
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	2,433	1,939	1,199	9,415	7,07	22,373	24,383	38,258	77,609	71,633	70,733
$V_{\partial p, i}^{\Sigma}$, см ³	2,433	4,372	1,199	10,614	17,683	40,056	64,439	102,697	180,307	251,939	322,673
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,233	0,75	1,415	1,849	3,05	4,166	5,781	8,888	11,479	14,443
$\bar{d}_{cp, \Sigma}$	0,48	0,466	0,75	0,7076	0,6163	0,6101	0,5952	0,5781	0,5555	0,5739	0,4814
\hat{d}_{cp}^o	1,0146	0,9854	1,2344	1,1647	1,0144	1,0041	0,9796	0,9515	0,9143	0,9446	0,7924
$r_{\partial p}$, мм	4,51	5,698	3,5003	8,287	10,321	14,641	17,887	21,703	27,293	31,21	34,46
α	0,5417	0,5725	0,1667	0,2066	0,3113	0,3196	0,34004	0,3649	0,40007	0,3712	0,5386
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,29	0,667	0,826	1,245	1,278	1,36	1,46	1,6003	1,485	2,154
\bar{l}_{κ}^{\max}	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
$\bar{r}_{\partial p}$, мм	0,7914	1	0,239	0,566	0,7049	1	1,2217	1,4823	1,864	2,132	2,354
$\bar{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,6024	1	0,3852	0,6249	0,6471	1	1,3131	1,7764	2,7093	3,076	6,322
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	1,2048	1	1,926	1,5621	1,0784	1	0,9379	0,8882	0,8467	0,7691	1,0537

Таблица 3.58 – Результаты расчетов опыта №17 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	3,8	11,3	4,5	76,85	54	149,48	103,2	78,6	45,9	8,8	0
$V_{op,\kappa}$, см ³	1,826	5,43	2,162	36,929	25,949	71,831	49,592	37,77	22,057	4,229	-
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	1,826	7,256	2,162	39,092	65,041	136,872	186,463	224,234	246,29	250,519	-
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,311	0,75	1,459	1,874	2,99	3,79	4,584	5,337	5,551	-
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,622	0,75	0,729	0,625	0,598	0,541	0,458	0,334	0,278	-
\hat{d}_{cp}°	0,8714	1,1286	1,3912	1,3527	1,1587	1,1091	1,0044	0,8502	0,6188	0,5148	-
r_{op} , мм	8,4187	12,4758	8,8004	21,2884	25,14	32,114	35,566	37,805	38,998	39,219	-
α	0,5417	0,3043	0,1667	0,1856	0,3004	0,3362	0,4234	0,5908	0,9989	1,3014	-
$6 \cdot \alpha$	3,25	1,826	1	1,114	1,802	2,017	2,54	3,545	5,993	7,809	-
$\bar{l}_{\sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	-
\bar{r}_{op} , мм	0,6748	1	0,274	0,6629	0,7828	1	1,1075	1,1772	1,2143	1,2212	-
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,2785	1	0,274	0,6326	0,6432	1	1,296	1,783	3,2024	4,7613	-
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,557	1	1,3702	1,581	1,072	1	0,9257	0,8915	1,0008	1,1903	-

Таблица 3.59 – Результаты расчетов опыта №18 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	5,05	17,6	4,65	99,25	59,1	150,1	91,9	77,05	65,1	13,2	0
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	2,362	8,232	2,175	46,422	27,643	70,206	42,984	36,038	30,449	6,174	-
$V_{\partial p, i}^{\Sigma}$, см ³	2,362	10,594	2,175	48,597	76,239	146,445	189,429	225,468	255,917	262,091	-
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,318	0,75	1,466	1,841	2,876	3,585	4,371	5,3973	5,694	-
$\bar{d}_{cp, \Sigma}$	0,48	0,636	0,75	0,7332	0,6137	0,5752	0,5121	0,4371	0,3373	0,2847	-
\hat{d}_{cp}^o	0,85999	1,140009	1,41396	1,3823	1,157	1,0845	0,9655	0,824	0,636	0,5368	-
$r_{\partial p}$, мм	4,4957	8,3497	4,3568	15,9963	19,3066	25,2283	27,9842	30,0046	31,5626	31,865	-
α	0,5417	0,2858	0,1667	0,1819	0,3147	0,3692	0,4763	0,644	0,9822	1,2562	-
$4 \cdot \alpha$	2,167	1,143	0,667	0,728	1,259	1,477	1,905	2,576	3,929	5,025	-
$\bar{l}_{\Sigma, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	-
$\bar{r}_{\partial p}$, мм	0,5384	1	0,1727	0,6341	0,7653	1	1,1092	1,1893	1,2511	1,2631	-
$\bar{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,2615	1	0,3101	0,7178	0,7141	1	1,2184	1,5631	2,4111	3,2332	-
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,523	1	1,5506	1,7945	1,1901	1	0,8703	0,7815	0,7535	0,8083	-

Таблица 3.60 – Результаты расчетов опыта №19 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	0,833	3,383	1,5	19,883	14,717	49,65	46,7	68,867	143,147	110,933	112,317
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	0,389	1,581	0,701	9,291	6,877	23,201	21,822	32,181	66,891	51,838	52,484
$V_{\partial p, i}^{\Sigma}$, см ³	0,389	1,97	0,701	9,992	16,869	40,07	61,893	94,073	160,964	212,802	265,287
d_{Σ}^{cp} , мм	0,12	0,325	0,75	1,447	1,877	3,106	4,126	5,623	8,688	10,957	13,735
$\bar{d}_{cp, \Sigma}$	0,48	0,649	0,75	0,724	0,626	0,621	0,589	0,562	0,543	0,548	0,458
\hat{d}_{cp}^o	0,8502	1,1498	1,2452	1,2015	1,0385	1,0314	0,9787	0,9335	0,9016	0,9095	0,7601
$r_{\partial p}$, мм	2,6295	4,8639	3,2308	9,5843	11,8955	16,8678	20,0767	23,9825	29,091	32,291	35,047
α	0,5417	0,2702	0,1667	0,1909	0,2994	0,3049	0,3482	0,3893	0,4208	0,4127	0,5921
$4 \cdot \alpha$	2,167	1,081	0,667	0,764	1,197	1,22	1,393	1,557	1,683	1,651	2,368
$\bar{l}_{\partial, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
$\bar{r}_{\partial p}$, мм	0,5406	1	0,1915	0,5682	0,7052	1	1,1902	1,4218	1,7246	1,9144	2,0778
$\bar{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,2638	1	0,3323	0,6494	0,6582	1	1,2745	1,7298	2,5026	2,9211	5,6519
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	0,5276	1	1,6614	1,6236	1,0971	1	0,9104	0,8649	0,7821	0,7303	0,942

Таблица 3.61 – Результаты расчетов опыта №20 (полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , ММ	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 16$	$16 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$
l_{κ}^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	16	20	30
d_{κ}^{cp} , ММ	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	13	18	25

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_{nop} , Г	0,5	2,167	1,167	13,683	11,117	41,933	43,283	57,833	127,233	131,217	133,65
$V_{op,\kappa}$, см ³	0,232	1,004	0,541	6,344	5,154	19,441	20,066	26,812	58,986	60,833	61,961
$V_{op,i}^{\Sigma}$, см ³	0,232	1,236	0,541	6,885	12,038	31,479	51,545	78,357	137,343	198,176	260,138
d_{Σ}^{cp} , ММ	0,12	0,327	0,75	1,441	1,894	3,195	4,287	5,728	8,851	11,66	14,837
$\bar{d}_{cp,\Sigma}$	0,48	0,654	0,75	0,721	0,631	0,639	0,612	0,573	0,553	0,583	0,495
\hat{d}_{cp}^o	0,8463	1,1537	1,2147	1,167	1,0227	1,0348	0,9918	0,9278	0,896	0,9442	0,801
r_{op} , ММ	4,5699	7,0257	5,5827	11,978	14,358	19,683	23,164	26,612	32,06	36,214	39,643
α	0,5417	0,2641	0,1667	0,1939	0,2918	0,2825	0,3165	0,3728	0,4038	0,3577	0,511
$6 \cdot \alpha$	3,25	1,585	1	1,164	1,751	1,695	1,899	2,237	2,423	2,146	3,066
$\bar{l}_{\sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3,2	4	6
\bar{r}_{op} , ММ	0,6505	1	0,2836	0,6085	0,7295	1	1,1768	1,352	1,6288	1,8398	2,014
$\bar{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,2472	1	0,2836	0,561	0,5756	1	1,3623	1,9633	3,2607	3,69997	8,555
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	0,4943	1	1,4181	1,4026	0,9594	1	0,9731	0,9816	1,019	0,925	1,4258

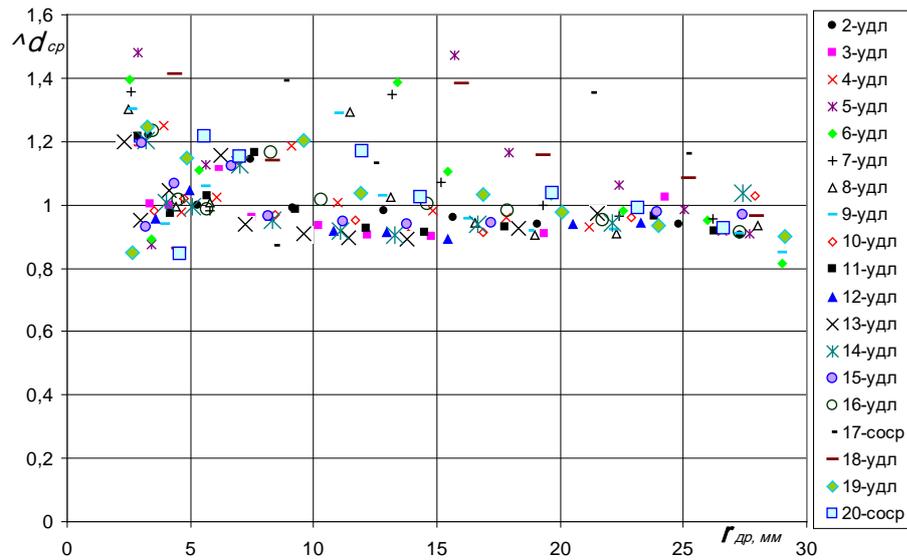


Рисунок 3.8 – Зависимость относительной величины среднего размера куска породы с удалением от оси заряда.

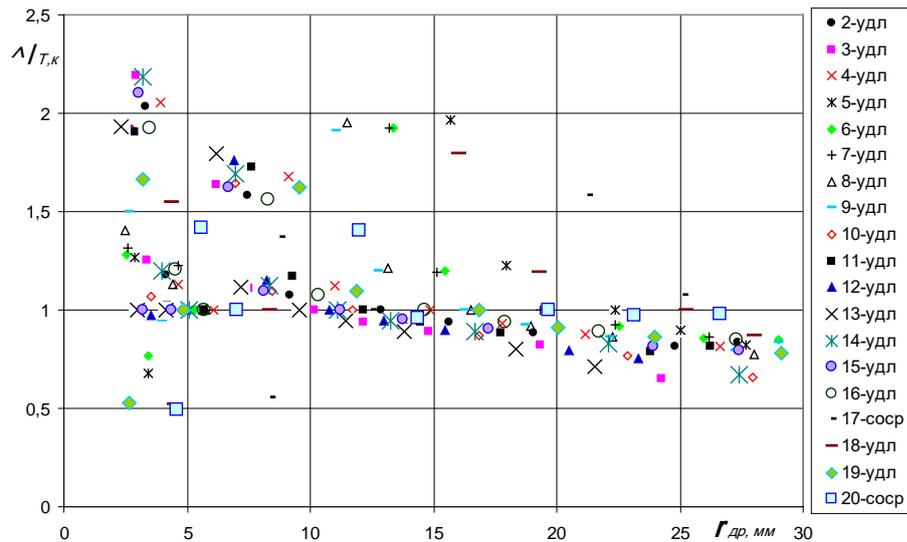


Рисунок 3.9 – Зависимость относительной величины максимального размера куска породы с удалением от оси заряда.

Для более наглядного анализа взрывного дробления образцов из полигалитовых пород приведём (рисунки 3.10 – 3.12) и рассмотрим три гистограммы распределения по размерам кусков масс фракций, получившихся при взрывном дроблении трех наиболее различающихся по свойствам пород. При этом в соответствии с правилами математической статистики за единицу измерения на оси абсцисс взята величина $\Delta d = 0,25$ мм, так что для всех других фракций число оди-

наковых значений на гистограмме находилось как отношение $\frac{d_i - d_{i-1}}{\Delta d}$. Например, для шестой фракции с размерами частиц от 3 мм до 5 мм число одинаковых значений на гистограмме получилось равным $\frac{5-3}{0,25} = 8$. Для удобства анализа гистограмм все значения масс отдельных фракций отнесены к массе первой фракции, так что на гистограммах приведены значения $-m_i = m_i / m_1$. Первичные оценки свидетельствуют, о том, что гистограмма на рисунке 3.10 отражает более крепкие породы, чем на рисунке 3.11, которая в свою очередь отражает породы более крепкие, чем гистограмма, представленная на рисунке 3.12.

Выполненные исследования взрывного дробления образцов из полигалитовых пород в лабораторных исследованиях позволили установить ряд очень важных факторов.

При взрывном разрушении полигалитовых пород имеет место трехмодальное распределение гранулометрического состава. Причем первая мода соответствует интенсивному мелкодисперсному дроблению пород на частицы размером $d_q \leq 0,5$ мм. Вторая мода соответствует формированию частиц размером $1 \leq d_q \leq 2$ мм. И, наконец, третья мода соответствует формированию частиц, размер которых $d_q > 3$ мм. Эти обстоятельства свидетельствуют, по-видимому, о формировании трех разных процессов взрывного разрушения полигалитовых пород. Обращает на себя внимание и то, что в этих опытах получились разные относительные величины максимальных значений второй моды. Причем не обнаружена тенденция изменения её относительной величины с изменением крепости пород.

Максимальные значения мод разные, а выход фракций с размерами частиц $d_q > 3$ мм практически равномерный за исключением проб №5 (галит) для которых выход фракции с $d_q > 20$ мм приблизительно в два раза меньше, участка $3 < d_q \leq 20$ мм.

Имеет место значительная вариабельность содержания фракций с $d_q > 20$ мм, что свидетельствует о влиянии дополнительных (боковых) поверхностей обнажения разрушаемых образцов на процесс их взрывного дробления.

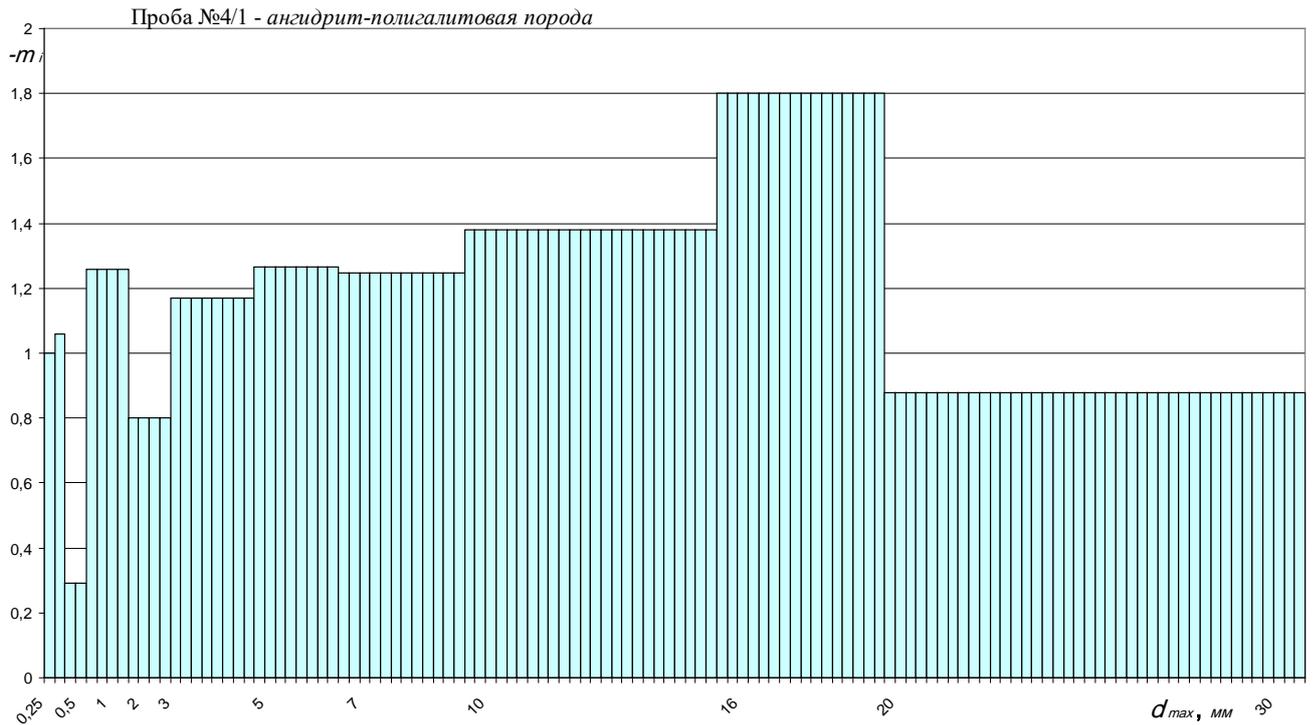


Рисунок 3.10 – Гистограмма распределения по размерам кусков масс фракций опыта №4.

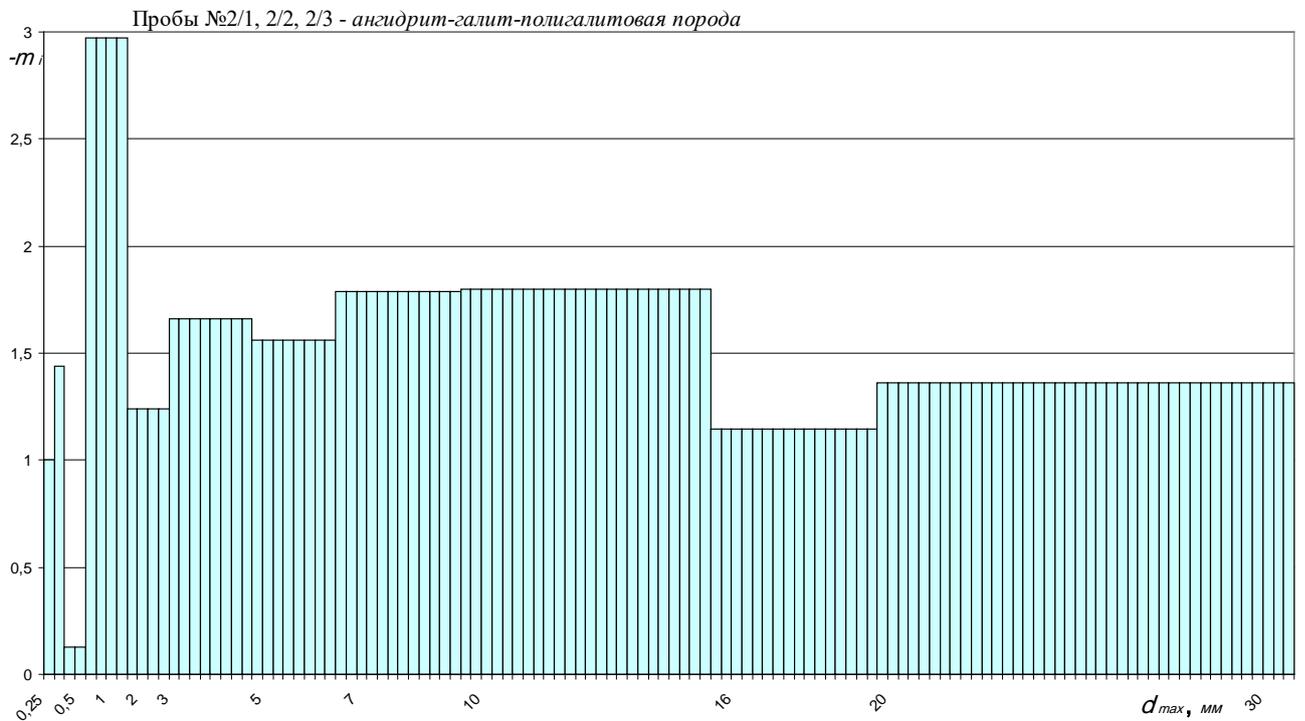


Рисунок 3.11 – Гистограмма распределения по размерам кусков масс фракций опыта №9.

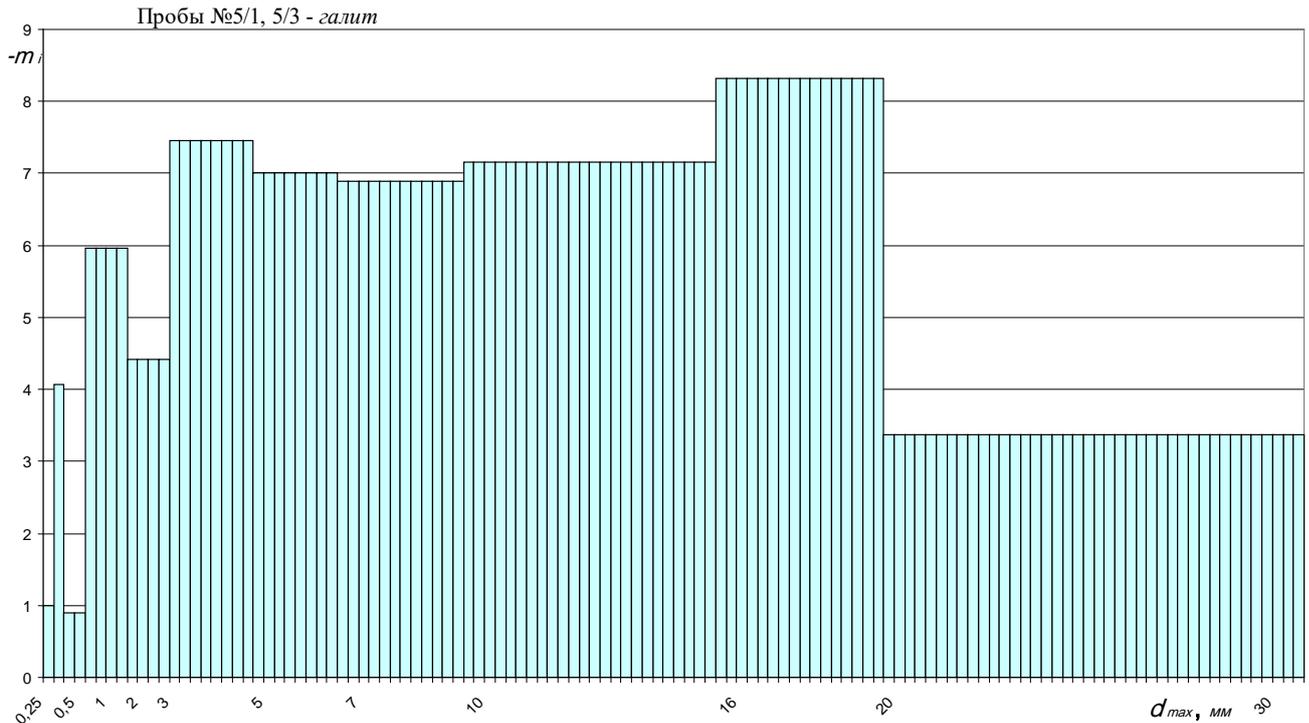


Рисунок 3.12 – Гистограмма распределения по размерам кусков масс фракций опыта №19.

Эти результаты экспериментальных исследований были использованы для анализа и установления обобщающих закономерностей, приведённых в главе 3 настоящей диссертации.

Необходимо подчеркнуть удовлетворительную сходимость разработанной теории с результатами этих лабораторных опытов. Основная часть опытных данных находится в интервале $\pm 20\%$ от теоретических оценок. Имеющиеся значительные отклонения в начале и в конце интервала обусловлены особенностями микростроения полигалитовых пород (начало интервала) и влиянием в конце интервала дополнительной поверхности обнажения (боковой поверхности кернов).

Также следует отметить, что аналогичное удовлетворительное согласование с теорией ФКСВ было получено ранее при взрывном дроблении силикатных блоков.

Эта сходимость опытных данных с оценками процессов дробления по ФКСВ теории позволяет принять ее за основу для оценки прочностных характеристик феноменологических свойств, разрушенных взрывом образцов полигалитовых пород.

3.4.9 Лабораторные исследования взрывного дробления полигалитовых пород (скв. №2 Восточно-Полесского объекта)

К испытаниям были представлены 12 кернов полигалитовых пород, имеющих длины от 140 до 260 мм и диаметрами 71, 72 и 73 мм. Для получения достоверных результатов о закономерностях взрывного разрушения этих пород из этих кернов также были изготовлены образцы приблизительно одинаковой длины 80-85 мм путем отпиливания торцов и их шлифовки. В образцах были пробурены шпуры диаметром 4,4 мм и длиной 56-59 мм. Длины зарядов составляли 28-32 мм, а их массы были равны 0,39-0,44 г. Опыты проводились с образцами четырех разных типов пород. Всего было проведено 5 серий опытов (таблица 3.62).

Таблица 3.62 – Данные последовательности проведения 5 опытов

№ опыта	№ керна (кол-во образцов)	Размеры образцов масса, г	$\rho_{пор}$, г/см ³	$d_{зар}$, мм	$m_{зар}$, г	Q , Дж/г	$l_{шп}$, мм	$l_{зар}$, мм	$\rho_{вв}$, г/см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	2023-1в (1).	$\frac{71 \times 85}{871,85}$	2,59	4,4	0,47	5024	56	34	0,9
3	2023-2в (1); 2023-3в (1).	$\frac{71 \times 81 - 83}{1849,2}$	2,85	4,4	0,39	5024	56	28,5	0,9
4	2027-1в (1); 2027-2в (1); 2027-3в (1).	$\frac{72 \times 80 - 82}{2763,35}$	2,78	4,4	0,44	5024	59	32	0,9
5	2054-1в (1); 2054-2в (1).	$\frac{73 \times 80 - 81}{1970,7}$	2,92	4,4	0,42	5024	59	30,5	0,9
6	2063-1в (1); 2063-2в (1); 2063-3в (1).	$\frac{73 \times 81 - 82}{2886,2}$	2,83	4,4	0,44	5024	59	32	0,9

В первом опыте отработывалась методика проведения и системы амортизации, исключаящие соударение кусков породы со стенками камеры. Затем с фиксированными параметрами зарядов и размеров образцов проводилось взрывное дробление последних. Разрушенные взрывом массы нескольких однотипных пород смешивались, обеспечивая усреднения результатов опытов. Затем производилось рассеивание этой массы и взвешивание фракций от 0,25 до 50 мм.

В скобках в втором столбце таблицы 3.62 приведено число взорванных образцов. Причем впоследствии массы фракций делились на число взорванных образцов, то есть находились усредненные значения масс фракций, приходящихся на взрывное дробление одного образца.

Результаты взрывного дробления всех опытов представлены в таблице 3.63.

Таблица 3.63 – Результаты в 5 опытах

κ , № фракц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$
l_k^{\max} , мм	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50
d_k^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45
2 ОПЫТ													
$m_{пор}$, Г	5,25	3,55	8,35	15,05	5,1	22,1	22,6	44,88	82,25	130	100,7	236,3	194,5
3 ОПЫТ													
$m_{пор}$, Г	3,685	2,835	6,75	12,9	3,515	18,25	17,575	26,875	26,83	56,94	236,1	353,7	157,2
4 ОПЫТ													
$m_{пор}$, Г	2,05	1,483	4,2	8,41	2,483	9,833	14,623	20,867	24,7	6,143	82,67	244,9	493,9
5 ОПЫТ													
$m_{пор}$, Г	2,715	1,66	3,435	6,1	2,2	8,825	10,965	14,425	36,63	30,73	104	234,7	527,6
6 ОПЫТ													
$m_{пор}$, Г	3,277	2	4,29	7,85	2,717	12	13,77	21,323	41,89	59,45	50,08	277,8	465,2

3.4.10 Анализ взрывного дробления образцов из полигалитовой породы (скв. №2 Восточно-Полесского объекта)

Также, как и в предыдущих исследованиях при анализе процесса взрывного дробления образцов использовались теоретические соотношения (3.24) – (3.29), (3.31) – (3.35) и (3.37), установленные в [83, 85].

Для каждого процесса разрушения породы принимались свои опорные значения $l_{он}$ и $r_{он}$. В зоне интенсивного мелкодисперсного дробления в качестве опорного значения максимальный размер кусков принимался равным $l_{он,1,э}^{\max} = 0,5$ мм, а в зоне трещинообразования – $l_{он,2,э}^{\max} = 5$ мм и соответствующие опорные значения внешних радиусов соответствующих зон разрушения.

В таблицах 3.64 – 3.68 приводятся результаты соответствующих расчетов закономерностей процесса взрывного дробления образцов из полигалитовой породы (скв. №2 Восточно-Полесского объекта) по данным 5 опытов.

Результаты обработки опытных данных со всеми образцами из полигалитовых пород (скв. №2 Восточно-Полесского объекта) 5 опытов представлены на рисунках 3.13 и 3.14.

Таблица 3.64 – Результаты расчетов опыта №2 (каинит-полигалитовая порода)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$
l_{κ}^{\max} , мм	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45
κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
m_{nop} , Г	5,25	3,55	8,35	15,05	5,1	22,1	22,6	44,88	82,25	130	100,7	236,3	194,5
$V_{op,\kappa}$, см ³	2,03	1,37	3,22	5,81	1,97	8,53	8,72	17,32	31,75	50,18	38,87	91,21	75,08
$V_{op,\kappa}^{\Sigma}$, см ³	2,03	3,4	6,62	12,43	14,4	22,93	31,65	48,98	80,72	130,9	169,8	261	336,1
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,12	0,22	0,75	1,23	1,46	2,57	3,63	5,48	8,36	11,96	15,01	22,09	27,26
$d_{cp,\Sigma}^{-}$	0,48	0,45	0,75	0,62	0,49	0,51	0,52	0,55	0,56	0,598	0,5	0,55	0,55
d_{cp}°	1,037	0,96	1,33	1,1	0,865	0,91	0,92	0,97	0,991	1,06	0,889	0,98	0,97
r_{op} , мм	4,56	5,54	7,27	9,45	10,06	12,23	13,99	16,76	20,56	24,97	27,69	33,01	36,9
α	0,542	0,621	0,167	0,311	0,528	0,473	0,465	0,412	0,397	0,336	0,5	0,406	0,417
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,49	0,67	1,25	2,11	1,89	1,86	1,65	1,59	1,35	1,999	1,62	1,67
l_{κ}^{\max}	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10
r_{op}^{-} , мм	0,82	1	0,59	0,77	0,82	1	1,14	1,37	1,68	2,04	2,27	2,699	3,02
$l_{T,\kappa}^{\max}$	0,65	1	0,707	0,73	0,66	1	1,28	1,68	2,28	2,61	5,12	5,007	6,32
$l_{T,\kappa}^{\circ}$	1,307	1	3,53	1,81	1,10	1	0,92	0,84	0,76	0,65	0,85	0,63	0,63

Таблица 3.65 – Результаты расчетов опыта №3 (каинит-полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$
l_{κ}^{\max} , мм	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45
κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
m_{nop} , г	3,685	2,835	6,75	12,9	3,515	18,25	17,575	26,875	26,825	56,94	236,1	353,725	157,21
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	1,29	0,995	2,37	4,53	1,234	6,408	6,17	9,44	9,42	19,99	82,9	124,2	55,203
$V_{\partial p, \kappa}^{\Sigma}$, см ³	1,29	2,289	4,66	9,19	10,42	16,83	23,003	32,44	41,86	61,85	144,8	268,97	324,169
$d_{\Sigma, \kappa}^{cp}$, мм	0,12	0,231	0,75	1,242	1,433	2,564	3,588	5,125	6,8808	10,445	18,915	26,407	29,596
$d_{cp, \Sigma}^{-}$	0,48	0,462	0,75	0,621	0,478	0,513	0,513	0,513	0,459	0,522	0,63	0,6602	0,5919
\hat{d}_{cp}°	1,019	0,981	1,32	1,093	0,841	0,903	0,902	0,902	0,807	0,919	1,11	1,1618	1,042
$r_{\partial p}$, мм	4,095	5,03	6,651	8,787	9,258	11,289	12,841	14,78	16,397	19,188	26,9966	36,124	40,33
α	0,542	0,583	0,167	0,305	0,547	0,475	0,476	0,476	0,59	0,457	0,293	0,257	0,345
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,331	0,667	1,22	2,186	1,8997	1,902	1,902	2,36	1,829	1,172	1,0295	1,379
$l_{\partial, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10
$r_{\partial p}^{-}$, мм	0,814	1	0,589	0,778	0,82	1	1,137	1,309	1,453	1,6997	2,391	3,1999	3,573
$l_{T, \kappa}^{\max}$	0,64	1	0,703	0,737	0,648	1	1,278	1,67	2,413	2,639	2,7785	3,312	5,788
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	1,281	1	3,51	1,842	1,08	1	0,913	0,835	0,804	0,66	0,463	0,414	0,579

Таблица 3.66 – Результаты расчетов опыта №4 (каинит-полигалитовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$
l_{κ}^{\max} , мм	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45
κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
m_{nop} , г	2,05	1,483	4,2	8,41	2,483	9,833	14,623	20,867	24,7	6,143	82,667	244,867	493,9
$V_{op,\kappa}$, см ³	0,737	0,53	1,51	3,02	0,89	3,54	5,26	7,5	8,88	2,21	29,72	88,04	177,58
$V_{op,\Sigma}^{\Sigma}$, см ³	0,737	1,27	2,78	5,8	6,697	10,23	15,49	22,99	31,87	34,08	63,81	151,85	329,427
$d_{\Sigma,\kappa}^{cp}$, мм	0,12	0,227	0,75	1,25	1,456	2,459	3,769	5,403	7,462	8,138	16,152	27,173	36,8198
$d_{cp,\Sigma}^{-}$	0,48	0,454	0,75	0,625	0,485	0,492	0,538	0,5403	0,497	0,407	0,538	0,679	0,736
\hat{d}_{cp}°	1,0277	0,972	1,312	1,093	0,849	0,8603	0,942	0,9449	0,87	0,712	0,942	1,188	1,288
r_{op} , мм	3,336	3,9396	5,228	7,017	7,44	8,877	10,56	12,45	14,258	14,658	18,947	26,816	37,562
α	0,542	0,601	0,167	0,2999	0,5303	0,516	0,429	0,425	0,505	0,7288	0,429	0,236	0,179
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,404	0,667	1,199	2,121	2,066	1,715	1,702	2,0202	2,915	1,715	0,944	0,716
$l_{\Sigma,\kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10
r_{op}^{-} , мм	0,847	1	0,589	0,7904	0,838	1	1,19	1,403	1,6061	1,651	2,134	3,021	4,231
$l_{T,\kappa}^{\max}$	0,697	1	0,703	0,754	0,688	1	1,348	1,779	2,6044	4,314	3,669	2,8398	2,809
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,395	1	3,513	1,885	1,147	1	0,963	0,889	0,8681	1,079	0,611	0,355	0,281

Таблица 3.67 – Результаты расчетов опыта №5 (полигалит-ангидритовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$
l_{κ}^{\max} , мм	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45
κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
m_{nop} , г	2,715	1,66	3,435	6,1	2,2	8,825	10,965	14,425	36,625	30,725	103,965	234,665	527,61
$V_{\partial p, \kappa}$, см ³	0,928	0,57	1,17	2,09	0,75	3,02	3,75	4,93	12,52	10,51	35,55	80,24	180,4
$V_{\partial p, \kappa}^{\Sigma}$, см ³	0,928	1,496	2,67	4,76	5,51	8,53	12,27	17,21	29,73	40,24	75,78	156,02	336,42
$d_{\Sigma, \kappa}^{cp}$, мм	0,12	0,217	0,75	1,23	1,468	2,555	3,753	5,243	8,462	10,913	17,654	26,661	36,539
$d_{cp, \Sigma}^{-}$	0,48	0,434	0,75	0,615	0,489	0,511	0,536	0,524	0,564	0,546	0,588	0,667	0,731
\hat{d}_{cp}°	1,0509	0,949	1,265	1,037	0,825	0,862	0,904	0,884	0,952	0,9204	0,993	1,124	1,233
$r_{\partial p}$, мм	3,611	4,222	5,2245	6,567	6,972	8,3485	9,722	11,186	14,026	15,88	20,519	27,393	39,091
α	0,542	0,653	0,167	0,313	0,522	0,479	0,433	0,454	0,386	0,416	0,3497	0,2502	0,184
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,614	0,667	1,253	2,087	1,914	1,73	1,814	1,545	1,665	1,3987	1,0007	0,737
$l_{\partial, \kappa}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10
$r_{\partial p}^{-}$, мм	0,855	1	0,626	0,787	0,835	1	1,165	1,3399	1,68	1,902	2,458	3,281	4,682
$l_{T, \kappa}^{\max}$	0,713	1	0,732	0,74	0,687	1	1,302	1,7005	2,229	2,918	3,518	3,284	3,119
$\hat{l}_{T, \kappa}^{\max}$	1,425	1	3,658	1,851	1,144	1	0,93	0,8502	0,743	0,729	0,586	0,41	0,312

Таблица 3.68 – Результаты расчетов опыта №6 (ангидритовая порода)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$
l_{κ}^{\max} , мм	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50
d_{κ}^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45
κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
m_{nop} , г	3,277	2	4,29	7,85	2,717	12	13,767	21,323	41,89	59,45	50,083	277,79	465,193
$V_{op,\kappa}$, см ³	1,16	0,71	1,52	2,78	0,96	4,25	4,87	7,54	14,82	21,03	17,72	98,29	164,59
$V_{op,\Sigma,k}^{\Sigma}$, см ³	1,16	1,87	3,38	6,16	7,12	11,37	16,24	23,78	38,61	59,64	77,36	175,65	340,24
$d_{\Sigma,k}^{cp}$, мм	0,12	0,217	0,75	1,235	1,466	2,598	3,751	5,386	8,256	11,621	14,762	26,208	35,349
$d_{cp,\Sigma}^{-}$	0,48	0,433	0,75	0,617	0,489	0,5197	0,536	0,539	0,5504	0,581	0,492	0,655	0,707
\hat{d}_{cp}°	1,051	0,949	1,282	1,055	0,835	0,888	0,916	0,9205	0,9407	0,993	0,84098	1,1198	1,208
r_{op} , мм	3,823	4,503	5,644	7,191	7,635	9,277	10,775	12,629	15,43	18,435	20,4796	28,438	38,186
α	0,542	0,654	0,167	0,3097	0,523	0,462	0,433	0,428	0,408	0,3605	0,516	0,263	0,207
$4 \cdot \alpha$	2,167	2,616	0,667	1,239	2,092	1,849	1,732	1,713	1,634	1,442	2,0646	1,052	0,829
$l_{\Sigma,k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10
r_{op}^{-} , мм	0,849	1	0,608	0,775	0,823	1	1,161	1,361	1,663	1,987	2,208	3,065	4,116
$l_{T,\kappa}^{\max}$	0,701	1	0,718	0,729	0,665	1	1,296	1,697	2,296	2,692	5,129	3,251	3,231
$\hat{l}_{T,\kappa}^{\max}$	1,403	1	3,59	1,824	1,1089	1	0,926	0,848	0,765	0,673	0,8548	0,406	0,323

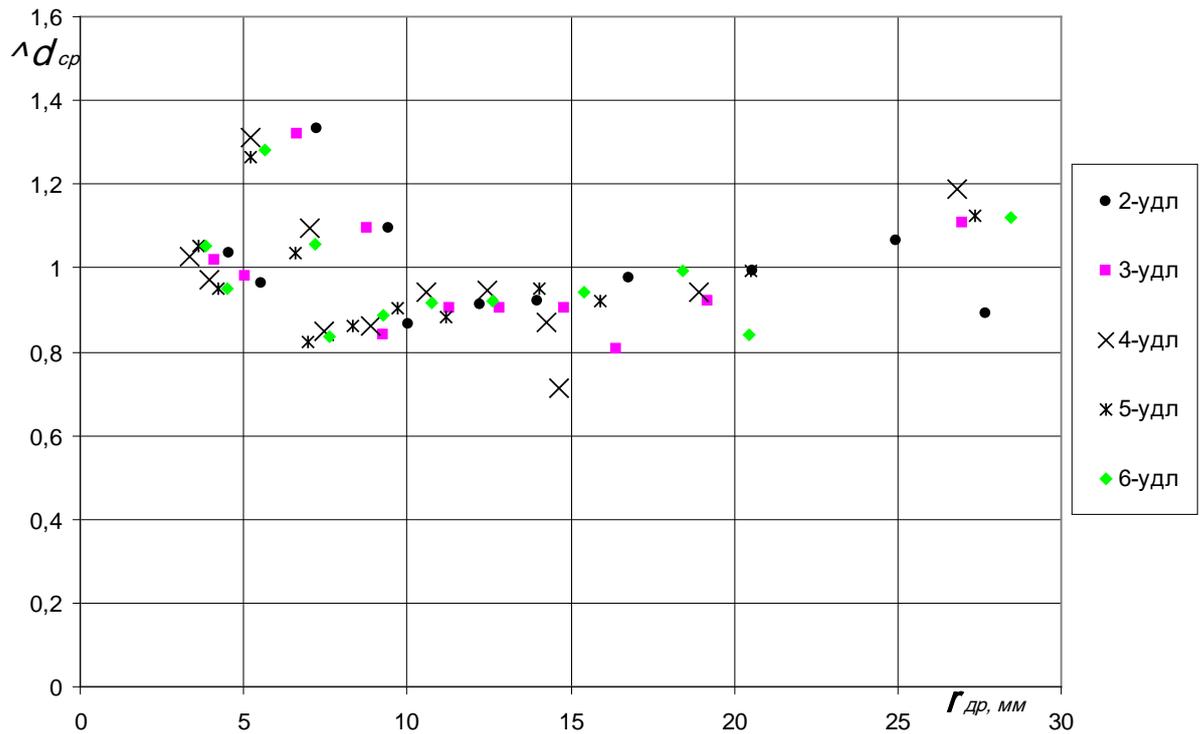


Рисунок 3.13 – Зависимость относительной величины среднего размера куска породы с удалением от оси заряда.

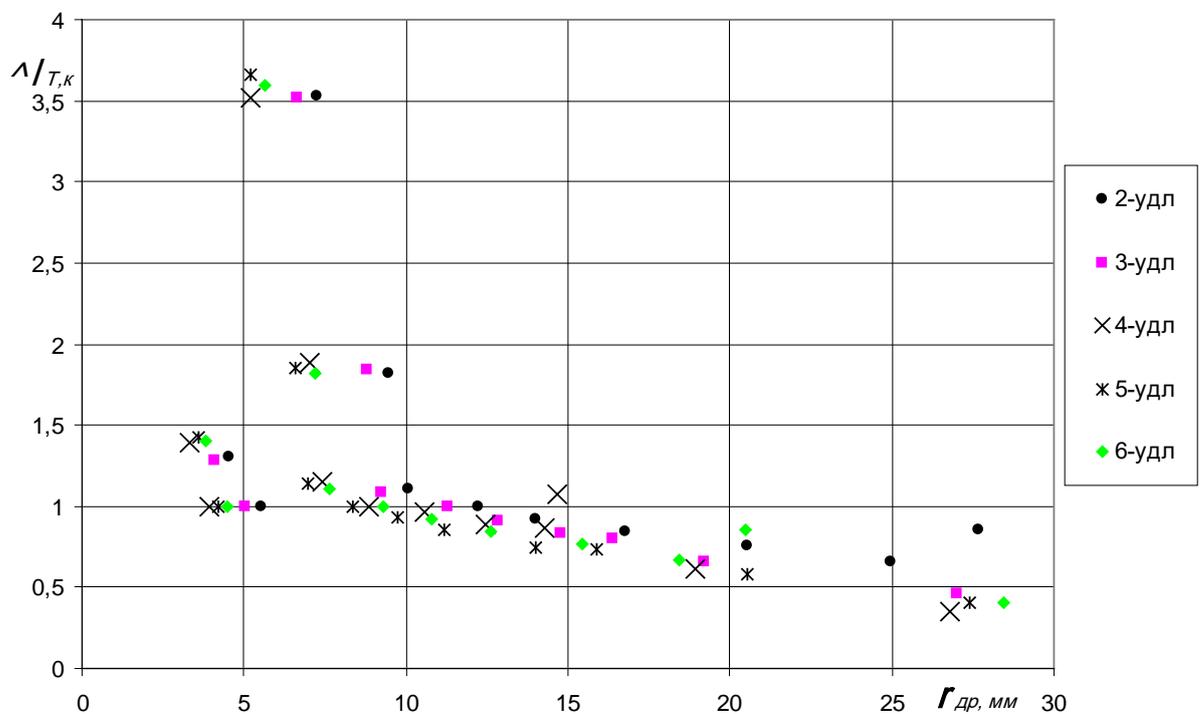


Рисунок 3.14 – Зависимость относительной величины максимального размера куска породы с удалением от оси заряда.

Следующий цикл работ заключался в необходимости сопоставления результатов опытно-промышленного взрывного дробления пород на карьерах с приведенными выше теоретическими зависимостями.

3.5 Экспериментальные натурные исследования взрывного дробления горных пород

Объект работ – негабариты известняков, разрушаемые взрывом шпуровых зарядов ПВВ на карьере «Жуково» ООО «Карбонат», проводились с целью:

1. Установления закономерностей формирования гранулометрического состава известняков при взрывном дроблении негабаритов.
2. Разработка, по этим опытным данным, рациональных параметров БВР, при которых будет обеспечиваться заданная степень взрывного рыхления ГП на карьерах.

3.5.1 Экспериментальное взрывное дробление негабаритов известняков

Работы по взрывному дроблению негабаритов осуществлялись при серийных массовых взрывах в соответствии с «ТИПОВЫМ ПРОЕКТОМ производства буровзрывных работ на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»» взрывперсоналом ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ» [176].

Работы по определению гранулометрического состава известняков, формирующегося при взрывном дроблении негабаритов, проводились представителями ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ», осуществлявшими также методическое руководство этими работами.

Опытно-промышленные работы проводились на уступах при серийных массовых взрывах в соответствии с «Программой и методикой оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном дроблении негабаритов известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»» (Приложение 3), при соблюдении требований: «Единых правил безопасности при взрывных работах» (ПБ 13-407-01) [49],

«Единых правил безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом» (ПБ 03-498-02) и действующих инструкций и проектно-технической документации на проведение ВР в условиях конкретного предприятия.

Объем работ – проведено 12 взрывных дроблений негабаритов.

Основанием для проведения опытно-промышленных работ являлся приказ по ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ». Приказом определялись порядок и участники в подготовке и проведении работ.

Методическое руководство работами осуществлялось ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ».

Контроль за проведением опытно-промышленных ВР осуществлял МТУ Ростехнадзора по ЦФО.

Проведение опытно-промышленных ВР осуществлялось в следующей последовательности:

1. Для проведения одного опытно-промышленного взрыва выбиралась одна негабаритная отдельность с наиболее правильной изометрической формой, подлежащая взрывному разрушению. Эта отдельность накатывается на брезент на расстоянии порядка 15-20 м от остальных негабаритных кусков.

2. Отобранные негабаритные отдельности измерялись, и оценивались их объем и массы.

3. Осуществлялись бурение шпуров в отобранных отдельностях, их заряжание и забойка в соответствии с «ТИПОВЫМ ПРОЕКТОМ производства буровзрывных работ на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»».

4. Для получения более достоверного гранулометрического состава горной массы при опытно-промышленном взрывном дроблении негабаритов известняков на экспериментальную взрываемую отдельность одевалась изношенная автомобильная покрышка (у которой, предварительно, вырезались бортовые кольца), через которую протягивались четыре стальных проволоки. Далее на всю высоту негабарита также одевались изношенные автомобильные покрышки (с предварительно вырезанными бортовыми кольцами) так, чтобы один из концов проволок

был с внешней стороны покрышек, а другой во внутреннем кольце, причем у последней (верхней) покрышки вырезалось только одно бортовое кольцо и она (покрышка) укладывалась вырезанной частью вниз. Сверху натягивалась металлическая сетка с ячейкой равной 20 мм и через нее протягивался один из концов каждой проволоки, находящийся во внутреннем кольце, после чего концы соответствующих проволок скреплялись.

5. В соответствии с «ТИПОВЫМ ПРОЕКТОМ производства буровзрывных работ на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»» [176] осуществлялось взрывное разрушение негабаритов.

После взрыва место взрывного дробления негабаритов осматривалось на наличие – отсутствие отказов.

6. Раскреплялись концы проволок, снималась и складывалась металлическая сетка. Снимались и убирались изношенные автомобильные покрышки.

7. Осуществлялось измерение крупных кусков породы размером $d > 30$ мм. Измеренные куски разделялись на фракции: $30 < d \leq 40$; $40 < d \leq 50$; $50 < d \leq 100$; $100 < d \leq 150$; $150 < d \leq 200$; $200 < d \leq 300$ и $d > 300$ мм. Каждая фракция взвешивалась.

8. Разрушенная взрывом масса каждого негабарита ссыпалась в мешки с соответствующим номером опыта. Затем раздробленная масса на куски менее 30 мм просеивалась на ситах, и каждая фракция также взвешивалась.

9. Для контроля сопоставлялась масса раздробленных кусков негабарита с его исходной массой.

Лица, назначенные приказом по предприятию ответственными за проведение работ, осуществляли контроль за их выполнением, вели учет параметров взрывов и полученных результатов.

Результаты и показатели ВР заносятся в специальные таблицы.

По результатам работ производилась разработка рациональных параметров БВР, применение которых должно обеспечить заданную степень взрывного рыхления ГП на карьерах (Приложение 4).

Результаты работ по каждому взрыву оформлялись актом работ, в котором

обобщена вся совокупность данных, полученных при проведении работ.

Результатами работ являлось определение гранулометрического состава горной массы при взрывном дроблении негабаритов известняков.

По окончании всех работ, составлялся обобщенный акт (Приложение 5).

После анализа результатов опытно-промышленного взрывного дробления негабаритов разрабатывались рациональные значения параметров БВР, применение которых должно обеспечить заданную степень взрывного рыхления ГП на карьерах.

Параметры зарядов ПВВ по взрывному дроблению негабаритов известняка на карьере «Жуково» ООО «Карбонат» приведены в таблице 3.69.

Таблица 3.69 – Показатели ВР по взрывному дроблению негабаритов известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»

Показатели	№ негабарита (опыта)					
	7	8	9	10	11	12
Объем негабарита, м ³ (a×b×c)	0,74×	0,60×	0,70×	1,00×	0,80×	0,78×
	0,63×	0,60×	0,57×	0,67×	0,63×	0,55×
	0,59	0,60	0,68	0,66	0,73	0,60
Количество шпуров, шт	1	1	1	1	1	1
Диаметр шпуров, мм	40	40	40	40	40	40
Длины шпуров, м	0,31	0,52	0,30	0,44	0,455	0,37
Длины зарядов, м	0,055	0,053	0,055	0,057	0,110	0,070
Массы зарядов, кг	0,054	0,048	0,054	0,056	0,100	0,067
Удельный расход ВВ, кг/м ³	0,2	0,22	0,2	0,13	0,27	0,26
Взрывчатое вещество	Аммонал					
Способ инициирования зарядов	Электрический, с использованием ЭДЗИ (ЭДБИ)					
Крепость пород (по СНиП)	VII-ая группа					
Плотность породы, кг/м ³	2,57	2,18	2,105	2,592	2,598	2,142

Первые 6 опытов были посвящены уточнению методики проведения эксперимента.

3.5.2 Анализ результатов взрывного дробления негабаритов известняков

При анализе результатов взрывного дробления негабаритов известняка была принята также модель взрывного разрушения рисунок 3.1 и (3.16).

В описываемых опытах дробления негабаритов известняков осуществлялось взрывом сосредоточенных зарядов (таблица 3.69), следовательно, при анализе опытных данных были использованы приведенные выше соотношения (3.12) – (3.15), (3.24) – (3.28), (3.30) – (3.34) и (3.36) – (3.37), которыми описывается разрушения породы взрывом зарядов ПВВ. Соотношениями (3.12) – (3.15) описывается процесс формирования кусков породы вследствие развития отдельных трещин в конических секторах, а соотношениям (3.24) – (3.28), (3.30) – (3.34) и (3.36) – (3.37) – формирование зон разрушения соответствующих конкретному объему первых k фракций.

Здесь аналогично экспериментальным лабораторным исследованиям также для каждого процесса разрушения породы принимались свои опорные значения l_{on} и r_{on} . В зоне интенсивного мелкодисперсного дробления в качестве опорного значения максимальный размер кусков принимался равным $l_{on,1,э}^{max} = 0,5$ мм, а в зоне трещинообразования – $l_{on,2,э}^{max} = 5$ мм и соответствующие опорные значения внешних радиусов соответствующих зон разрушения.

Анализировался процесс интенсивного бризантного дробления негабаритов известняка, взрывом зарядов ПВВ.

В таблицах 3.70 – 3.75 приводятся результаты расчетов с 7-го опыта по 12-ый опыт.

Таблица 3.70 – Результаты расчетов опыта №7 (известняк)

κ , № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$	$50 < d \leq 500$
l_k^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	500
d_k^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45	275
$m_{\text{пор}}$, Г	15	157	536	623	150	543	615	940	1492	2056	960	2099	3185	470898
$V_{\text{др}k}$, см ³	5,836	61,087	208,6	242,401	58,36	211,3	239,3	365,7	580,52	800	373,52	816,7	1239,2	183220
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}$, см ³	5,836	66,923	208,6	450,951	509,3	720,6	959,9	1326	1906,1	2706	3079,6	3896	5135,5	188355
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}$, мм	0,12	0,3528	0,75	1,15315	1,307	2,097	3,07	4,568	6,9838	10,09	11,901	16,74	23,561	268,14
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	0,48	0,7055	0,75	0,57657	0,436	0,419	0,439	0,457	0,4656	0,505	0,3967	0,419	0,4712	0,5363
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	0,81	1,1902	1,533	1,17866	0,891	0,857	0,897	0,934	0,9518	1,032	0,8109	0,856	0,9633	1,0963
$r_{\text{др}}$, мм	25,88	32,361	41,29	50,8037	52,61	58,26	63,48	70,14	78,628	87,93	91,659	98,89	108,17	355,9
α	0,542	0,2087	0,167	0,36719	0,647	0,692	0,64	0,595	0,5739	0,491	0,7604	0,695	0,5611	0,4323
6α	3,25	1,2522	1	2,20314	3,883	4,153	3,841	3,567	3,4435	2,945	4,5626	4,167	3,3664	2,594
$\bar{l}_{\text{y}k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10	100
$\bar{r}_{\text{др}}$, мм	0,8	1	0,709	0,87203	0,903	1	1,09	1,204	1,3496	1,509	1,5733	1,697	1,8567	6,1089
$\bar{l}_{\text{т}k}^{\max}$	0,484	1	0,709	0,73958	0,673	1	1,39	1,939	2,808	3,361	7,9063	9,071	8,0298	109,34
$\hat{l}_{\text{т}k}^{\max}$	0,967	1	3,544	1,84895	1,121	1	0,993	0,969	0,936	0,84	1,3177	1,134	0,803	1,0934

Таблица 3.71 – Результаты расчетов опыта №8 (известняк)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$	$50 < d \leq 500$
l_k^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	500
d_k^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45	275
$m_{\text{пор}}$, Г	36	150	263	343	88	295	302	431	712	866	328	1068	1720	392062
$V_{\text{др}k}$, см ³	16,5	68,8	120,6	157,3	40,4	135	138,5	197,7	326,6	397,2	150,5	489,9	789	179845
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}$, см ³	16,5	85,3	120,6	278	318,3	453,67	592,2	789,9	1116,5	1513,8	1664,2	2154,1	2943,1	182788
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}$, мм	0,12	0,326	0,75	1,175	1,343	2,135	3,039	4,406	6,774	9,589	10,982	16,444	24,099	270,96
$\bar{a}_{\text{cp}\Sigma}$	0,48	0,651	0,75	0,587	0,448	0,427	0,434	0,441	0,452	0,479	0,366	0,411	0,482	0,542
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	0,849	1,151	1,547	1,211	0,923	0,881	0,895	0,909	0,931	0,989	0,755	0,848	0,994	1,118
$r_{\text{др}}$, мм	27,13	33,74	36,24	44,41	46,06	50,85	54,87	59,8	66,48	73,09	75,3	81,7	90,3	352,4
α	0,542	0,268	0,167	0,351	0,617	0,671	0,652	0,635	0,607	0,543	0,866	0,716	0,537	0,423
6α	3,25	1,61	1	2,109	3,704	4,03	3,909	3,809	3,643	3,257	5,195	4,297	3,224	2,536
$\bar{l}_{\text{э}k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10	100
$\bar{r}_{\text{др}}$, мм	0,804	1	0,713	0,873	0,906	1	1,079	1,176	1,307	1,437	1,481	1,607	1,776	6,929
$\bar{l}_{\text{т}k}^{\max}$	0,492	1	0,713	0,752	0,693	1	1,346	1,854	2,654	3,261	7,692	7,684	6,374	135,481
$\hat{l}_{\text{т}k}^{\max}$	0,985	1	3,563	1,879	1,156	1	0,962	0,927	0,885	0,815	1,282	0,961	0,637	1,355

Таблица 3.72 – Результаты расчетов опыта №9 (известняк)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$	$50 < d \leq 500$
l_k^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	500
d_k^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45	275
$m_{\text{пор}}$, Г	81	324	1079	2558	346	1205	1211	1777	2920	3691	1761	2844	5110	341584
$V_{\text{др}k}$, см ³	38,5	153,9	512,6	1215	164,4	572,5	575,4	844	1387	1753,6	836,7	1351	2427,8	162288
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}$, см ³	38,5	192,4	512,6	1727,96	1892	2464,8	3040,2	3884,4	5271,8	7025,4	7862	9213,2	11641	173929
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}$, мм	0,12	0,324	0,75	1,277	1,384	1,991	2,75	3,9997	6,237	9,048	10,746	14,303	20,705	257,98
$\bar{a}_{\text{cp}\Sigma}$	0,48	0,648	0,75	0,639	0,461	0,398	0,393	0,39997	0,416	0,452	0,358	0,358	0,414	0,516
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	0,851	1,149	1,62	1,38	0,996	0,86	0,849	0,864	0,898	0,977	0,774	0,772	0,895	1,115
$r_{\text{др}}$, мм	29,74	40,47	52,7	76,27	78,49	85,38	91,28	98,79	109,1	119,8	124,3	130,96	141,4	346,6
α	0,542	0,272	0,167	0,283	0,584	0,755	0,773	0,75	0,703	0,605	0,896	0,898	0,707	0,469
6α	3,25	1,63	1	1,697	3,504	4,532	4,636	4,501	4,215	3,631	5,375	5,39	4,245	2,814
$\bar{l}_{\text{э}k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10	100
$\bar{r}_{\text{др}}$, мм	0,735	1	0,617	0,893	0,919	1	1,069	1,157	1,278	1,403	1,456	1,534	1,656	4,0595
$\bar{l}_{\text{т}k}^{\max}$	0,367	1	0,617	0,826	0,745	1	1,363	1,929	2,811	3,424	7,538	10,033	8,519	51,582
$\hat{l}_{\text{т}k}^{\max}$	0,735	1	3,087	2,065	1,241	1	0,974	0,965	0,937	0,856	1,256	1,254	0,852	0,516

Таблица 3.73 – Результаты расчетов опыта №10 (известняк)

к, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$	$50 < d \leq 500$
l_k^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	500
$d_k^{\text{ср}}$, мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45	275
$m_{\text{пор}}$, Г	99	289	778	866	295	1234	1348	2094	3356	4076	2086	4843	7146	528597
$V_{\text{др}k}$, см ³	38,19	111,5	300,2	334,1	113,8	476,1	520,1	807,9	1295	1572,5	804,8	1868,4	2756,9	203934
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}$, см ³	38,19	149,7	300,2	634,3	748,1	1224,2	1744,2	2552,1	3847	5419,4	6224,2	8092,6	10849,5	214784
$d_{\Sigma k}^{\text{ср}}$, мм	0,12	0,31	0,75	1,145	1,351	2,381	3,4603	5,056	7,561	10,445	12,327	17,562	24,534	262,348
$\bar{d}_{\text{ср}\Sigma}$	0,48	0,62	0,75	0,573	0,4504	0,476	0,494	0,506	0,504	0,522	0,411	0,439	0,491	0,525
$\hat{d}_{\text{ср}}^{\circ}$	0,873	1,127	1,466	1,119	0,88	0,931	0,966	0,988	0,985	1,021	0,803	0,858	0,959	1,025
$r_{\text{др}}$, мм	29,838	38,19	45,44	56,12	58,945	68,493	76,467	86,305	98,49	110,09	115,2	125,5	138,2	371,8
α	0,542	0,307	0,167	0,373	0,6101	0,5498	0,511	0,489	0,492	0,457	0,717	0,639	0,519	0,453
6α	3,25	1,84	1	2,24	3,661	3,299	3,069	2,934	2,951	2,744	4,301	3,833	3,114	2,718
$\bar{l}_{\text{э}k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10	100
$\bar{r}_{\text{др}}$, мм	0,781	1	0,663	0,819	0,8606	1	1,116	1,26	1,438	1,607	1,682	1,832	2,018	5,428
$\bar{l}_{\text{т}k}^{\max}$	0,448	1	0,663	0,64	0,577	1	1,402	1,97	2,922	3,678	9,3497	10,189	8,896	99,193
$\hat{l}_{\text{т}k}^{\max}$	0,897	1	3,317	1,6	0,962	1	1,001	0,985	0,974	0,919	1,558	1,274	0,89	0,992

Таблица 3.74 – Результаты расчетов опыта №11 (известняк)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$	$50 < d \leq 500$
l_k^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	500
d_k^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45	275
$m_{\text{пор}}$, Г	304	1077	2532	3528	971	4024	5250	7141	11444	13130	7699	11309	18658	483754
$V_{\text{др}k}$, см ³	117	414,5	974,5	1357,8	373,7	1548,7	2020,6	2748,4	4404,5	5053,4	2963,1	4352,5	7180,9	186183
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}$, см ³	117	531,5	974,5	2332,3	2706	4254,8	6275,3	9023,7	13428	18481,5	21445	25797	32978	219161
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}$, мм	0,12	0,319	0,75	1,187	1,368	2,326	3,509	5,029	7,48	10,219	12,262	16,098	22,391	236,989
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	0,48	0,638	0,75	0,593	0,456	0,465	0,501	0,503	0,499	0,511	0,409	0,402	0,448	0,474
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	0,859	1,141	1,497	1,184	0,91	0,929	1,0007	1,0039	0,995	1,02	0,816	0,803	0,894	0,946
$r_{\text{др}}$, мм	38,23	54,25	64,51	84,276	88,32	102,05	115,69	130,23	148,36	164,81	173,1	183,99	199,56	374,3
α	0,542	0,284	0,167	0,343	0,596	0,575	0,497	0,494	0,503	0,479	0,723	0,742	0,616	0,555
6α	3,25	1,704	1	2,056	3,579	3,449	2,985	2,965	3,016	2,871	4,34	4,454	3,699	3,329
$\bar{l}_{\Sigma k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10	100
$\bar{r}_{\text{др}}$, мм	0,705	1	0,632	0,826	0,865	1	1,134	1,276	1,454	1,615	1,696	1,803	1,955	3,668
$\bar{l}_{\tau k}^{\max}$	0,321	1	0,632	0,675	0,596	1	1,454	2,0604	3,091	3,96	9,905	13,809	11,949	75,712
$\hat{l}_{\tau k}^{\max}$	0,641	1	3,161	1,687	0,994	1	1,038	1,0302	1,0304	0,99	1,651	1,726	1,195	0,757

Таблица 3.75 – Результаты расчетов опыта №12 (известняк)

κ, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$	$50 < d \leq 500$
l_k^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	500
d_k^{cp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45	275
$m_{\text{пор}}$, Г	368	886	2771	2570	511	1554	1640	2182	3540	4406	1951	3711	5449	302620
$V_{\text{др}k}$, см ³	171,8	413,7	1294	1200	238,6	725,6	765,8	1018,9	1653	2057,3	911	1732,8	2544	141306
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}$, см ³	171,8	585,5	1294	2494	2733	3458	4223,9	5242,8	6896	8953,1	9864,1	11596,9	14141	155447
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}$, мм	0,12	0,3	0,75	1,111	1,232	1,813	2,572	3,724	5,828	8,5099	10,033	13,763	19,384	251,75
$\bar{a}_{\text{cp}\Sigma}$	0,48	0,6	0,75	0,555	0,411	0,363	0,367	0,372	0,389	0,425	0,334	0,344	0,388	0,503
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	0,889	1,111	1,73	1,281	0,947	0,836	0,848	0,859	0,896	0,981	0,771	0,794	0,894	1,161
$r_{\text{др}}$, мм	39,89	55,05	69,81	85,8	88,3	95,27	101,59	108,96	119,15	129,77	133,97	141,28	150,8	333,9
α	0,542	0,333	0,167	0,4	0,717	0,879	0,861	0,843	0,787	0,675	0,995	0,953	0,7897	0,493
6α	3,25	1,997	1	2,401	4,304	5,274	5,165	5,056	4,721	4,0506	5,971	5,719	4,738	2,958
$\bar{l}_{\Sigma k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10	100
$\bar{r}_{\text{др}}$, мм	0,725	1	0,733	0,901	0,927	1	1,066	1,144	1,251	1,362	1,406	1,483	1,583	3,505
$\bar{l}_{\tau k}^{\max}$	0,351	1	0,733	0,778	0,722	1	1,393	1,972	2,875	3,498	7,655	9,522	8,817	40,855
$\hat{l}_{\tau k}^{\max}$	0,702	1	3,664	1,944	1,204	1	0,995	0,986	0,958	0,874	1,276	1,1902	0,882	0,409

Результаты обработки опытных данных по бризантному дроблению части негабаритов известняка представлены на рисунках 3.15 и 3.16.

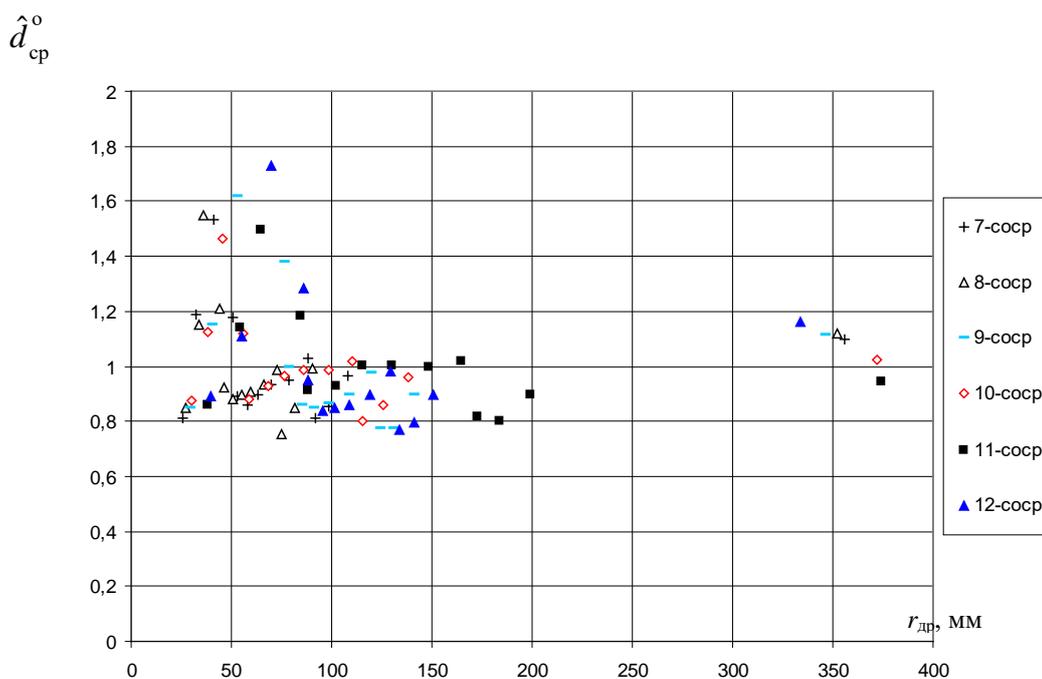


Рисунок 3.15 – Зависимость относительной величины среднего размера куска породы с удалением от оси заряда.

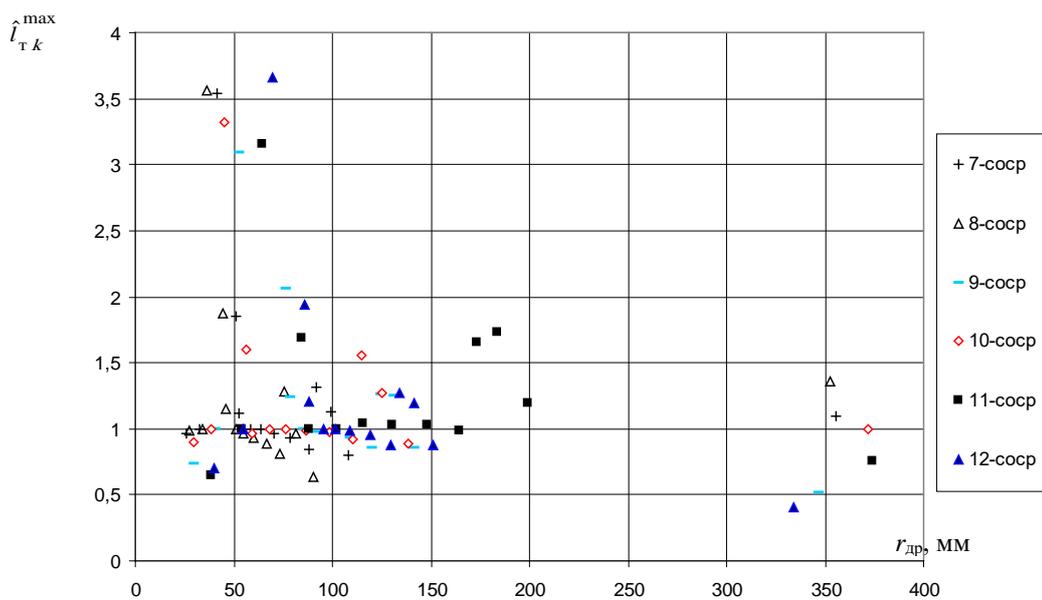


Рисунок 3.16 – Зависимость относительной величины максимального размера куска породы с удалением от оси заряда.

Основная часть экспериментальных точек расположена около $\hat{l}_{TK}^{\max} = 1$ и $\hat{d}_{cp}^o = 1$ (рисунки 3.15 и 3.16), подтверждая тем самым достоверность предложен-

ных соотношений по оценки степени трещинообразования – формирования кусков и объемов соответствующих разрушений. При этом отличия опытных данных от теоретических не превышает 20%. Наибольшее отличие опытных значений от теоретических $\hat{i}_{TK}^{\max} = 1$ и $\hat{d}_{cp}^o = 1$ имеют место только при интенсивном мелкодисперсном дроблении с размером частиц до 3 мм. Однако следует учесть, что при проведении описываемых опытов очень трудно обеспечить сохранность (исключить разлет, потери) этой мелкодисперсной фракции породы, чем частично и обусловлен указанное отличие опытных данных от теоретических оценок. Вместе с тем необходимо отметить, что в [83] при проведении лабораторных достаточно достоверных опытов во взрывной камере также наблюдалось существенное отличие экспериментальных данных от теоретических в указанной области для $d_{\text{част}} \leq 3$ мм. Таким образом, эти отличия опытных данных от теоретических оценок для частиц $d_{\text{част}} \leq 3$ мм свидетельствуют о существенном отличии реального процесса интенсивного мелкодисперсного дробления пород от теоретических соотношений (3.12) – (3.15) и (3.24) – (3.28), (3.30) – (3.34), (3.36) – (3.37). То есть предложенные указанными выше соотношениями описание процесса трещинообразования и формирования соответствующих объемов достоверно описывают процесс разрушения ГП $d_{\text{част}} > 3$ мм. Объем интенсивного мелкодисперсного дробления $d_{\text{част}} \leq 3$ мм составляет $\sim 0,2 - 0,3\%$ от всего объема разрушения. Следовательно, погрешность расчетов объемов разрушения по установленным теоретическим соотношениям (3.12) – (3.15) и (3.24) – (3.28), (3.30) – (3.34), (3.36) – (3.37) будет обусловленная в основном вариацией опытных данных при определении объемов более крупных фракций. Таким образом, экспериментальные исследования, выполненные в натуральных условиях, удовлетворительно согласуются с предложенной теоретической моделью процесса формирования кусков породы в зоне регулируемого дробления. Так, что по предложенной теоретической модели с погрешностью $\pm 20\%$, могут быть рассчитаны или спрогнозированы объемы регулируемого дробления и средний размер кусков породы в этой зоне.

Выводы по главе 3

1. Разработано обобщенное соотношение для первого критерия оценки эффективности взрывного дробления ГП на карьерах - выхода негабарита. Установленные соотношения справедливы для широкого диапазона классов ГП и типов ПВВ.

2. Принятая теоретическая модель формирования кусков породы в зоне её регулируемого дробления взрывом зарядов ПВВ, также позволяющая рассчитывать и гранулометрический состав в этой зоне и второй критерий – средний размер кусков породы в развале.

3. При взрывном разрушении полигалитовых пород имеет место трехмодальное распределение гранулометрического состава. Причем первая мода соответствует интенсивному мелкодисперсному дроблению пород на частицы размером $d_q \leq 0,5$ мм. Вторая мода соответствует формированию частиц размером $1 \leq d_q \leq 2$ мм. И, наконец, третья мода соответствует формированию частиц, размер которых $d_q > 3$ мм. Эти обстоятельства свидетельствуют, о формировании трех разных процессов взрывного разрушения полигалитовых пород.

4. Максимальные значения мод разные, а выход фракций с размерами частиц $d_q > 3$ мм практически равномерный за исключением проб 5 (галит) для которых выход фракции с $d_q > 20$ мм приблизительно в два раза меньше, участка $3 < d_q \leq 20$ мм.

5. Значительная вариабельность содержания фракций с $d_q > 20$ мм свидетельствует о влиянии дополнительных (боковых) поверхностей обнажения разрушаемых образцов на процесс их взрывного дробления.

6. Предложенная модель удовлетворительно согласуется с результатами лабораторных исследований взрывного дробления двух принципиально разных пород.

7. Анализ результатов разрушенных взрывом негабаритов известняка свидетельствует о том, что в этом случае имело место два разных процесса: интенсив-

ное разрушение на куски размером до 50 мм в зоне примыкающей к взрываемому заряду – условно этот процесс взрывного разрушения известняка считается как бризантное воздействие взрыва зарядов на известняк и разделение негабарита отдельными трещинами на куски 200 мм и более, считается, что этот процесс определялся поршневым эффектом воздействия на негабарит ПД взорванного заряда ПВВ.

8. Результаты взрывного дробления негабаритов известняка подтвердили предложенные закономерности формирования гранулометрического состава горной массы в зоне регулируемого дробления и модель формирования этой зоны около взорванного заряда.

9. Предложенные соотношения позволяют с погрешностью $\pm 20\%$ прогнозировать формирование гранулометрического состава горной массы и средний размер кусков породы в зоне регулируемого дробления.

4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВНОГО ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

4.1 Анализ результатов опытно-промышленных взрывов на разрезах (по данным М.Н. Оверченко)

Анализ и обобщение результатов исследований, выполненных ранее по взрывному дроблению ГП показал, что данные полученные М.Н. Оверченко и приведенные им в своей диссертационной работе [127] позволяют провести анализ и обработку проведенных опытно-промышленных взрывов, исходные данные которых представлены в таблице 4.1, по разработанной теории.

Таблица 4.1 – Таблица исходных данных рандомизированной последовательности проведения опытов (по данным М.Н. Оверченко)

№ опыта	месторождение	ВВ	Блок	$d_{зар}$, м	$m_{зар}$, кг	$l_{скв}$, м	$l_{зар}$, м	$\rho_{вв}$, кг/м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	разрез "Сибиргинский"	гранулит-НП	5×6×30	0,22	1143	35	31	970
3	разрез "Красногорский"	2/3 сибирит-2500РЗ 1/3 гранулит-НП	5,5×6×30	0,22	1102	32	28	1035
4	разрез "Красногорский"	гранулит-НП	5×6×30	0,22	1032	32	28	970
6	разрез "Медуреченский"	1/2 сибирит-1200 1/2 гранулит-НП	6×6×45	0,22	1573	48	42	985
8	разрез "Калтанский"	гранулит ТКЗ-15	6×6×10	0,22	295	12	8	970
9	разрез "Калтанский"	гранулит УП-1Б	6×6×10	0,22	295	12	8	970
10	разрез "Калтанский"	порэмит	6×6×10	0,22	350	12	8	1150

Обработка экспериментальных данных выполнялось в соответствии с ФКСВ теорией разрушения ГП взрывом зарядов ПВВ, разработанной в МГГУ.

При анализе результатов опытно-промышленных взрывов на разрезах была также использована модель взрывного разрушения (рисунок 3.1 и (3.16)), а результаты расчетов приведены в таблицах 4.2 – 4.8.

Таблица 4.2 – Результаты расчетов 2 опыта -
разрез "Сибиргинский" (гранулит-НП)

к, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7
$d, \text{м}$	$\leq 0,2$	$0,2 < d \leq 0,4$	$0,4 < d \leq 0,6$	$0,6 < d \leq 0,8$	$0,8 < d \leq 1,0$	$1,0 < d \leq 1,2$	$1,2 < d \leq 1,4$
l_k^{\max}	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
$d_k^{\text{cp}}, \text{м}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
$V_{\text{др}k}, \text{м}^3$	244,8	236,7	153,9	138,6	90,9	35,1	-
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}, \text{м}^3$	244,8	481,5	635,4	774	864,9	900	-
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}, \text{м}$	0,1	0,198	0,271	0,348	0,406	0,433	-
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	0,5	0,496	0,452	0,435	0,406	0,361	-
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	1,132	1,122	1,024	0,985	0,919	0,817	-
$r_{\text{др}}, \text{м}$	1,539	2,131	2,432	2,672	2,816	2,8698	-
α	0,5	0,508	0,605	0,649	0,731	0,885	-
4α	2	2,034	2,422	2,596	2,924	3,54	-
$\bar{l}_{\text{ок}}^{\max}$	1	2	3	4	5	6	-
$\bar{r}_{\text{др}}, \text{м}$	1	1,384	1,58	1,736	1,8297	1,864	-
$\bar{l}_{\text{тк}}^{\max}$	1	1,938	3,029	4,185	5,852	9,074	-
$\hat{l}_{\text{тк}}^{\max}$	1	0,969	1,0097	1,046	1,1703	1,512	-

Таблица 4.3 – Результаты расчетов 3 опыта -
разрез "Красногорский" (2/3 сибирит-2500Р3 и 1/3 гранулит-НП)

к, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7
$d, \text{м}$	$\leq 0,2$	$0,2 < d \leq 0,4$	$0,4 < d \leq 0,6$	$0,6 < d \leq 0,8$	$0,8 < d \leq 1,0$	$1,0 < d \leq 1,2$	$1,2 < d \leq 1,4$
l_k^{\max}	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
$d_k^{\text{cp}}, \text{м}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
$V_{\text{др}k}, \text{м}^3$	447,48	338,58	156,42	47,52	-	-	-
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}, \text{м}^3$	447,48	786,06	942,48	990	-	-	-
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}, \text{м}$	0,1	0,186	0,238	0,2604	-	-	-
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	0,5	0,465	0,397	0,3255	-	-	-
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	1,185	1,103	0,9409	0,771	-	-	-
$r_{\text{др}}, \text{м}$	2,151	2,809	3,0595	3,13099	-	-	-
α	0,5	0,574	0,759	1,036	-	-	-
4α	2	2,298	3,037	4,144	-	-	-
$\bar{l}_{\text{ок}}^{\max}$	1	2	3	4	-	-	-
$\bar{r}_{\text{др}}, \text{м}$	1	1,306	1,422	1,456	-	-	-
$\bar{l}_{\text{тк}}^{\max}$	1	1,847	2,917	4,742	-	-	-
$\hat{l}_{\text{тк}}^{\max}$	1	0,924	0,972	1,186	-	-	-

Таблица 4.4 – Результаты расчетов 4 опыта -
разрез "Красногорский" (гранулит-НП)

к, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7
$d, \text{м}$	$\leq 0,4$	$0,4 < d \leq 0,6$	$0,6 < d \leq 0,8$	$0,8 < d \leq 1,0$	$0,8 < d \leq 1,0$	$1,0 < d \leq 1,2$	$1,2 < d \leq 1,4$
l_k^{\max}	0,4	0,6	0,8	1,0	1	1,2	1,4
$d_k^{\text{cp}}, \text{м}$	0,2	0,5	0,7	0,9	0,9	1,1	1,3
$V_{\text{др}k}, \text{м}^3$	574,2	211,5	106,2	8,1	-	-	-
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}, \text{м}^3$	574,2	785,7	891,9	900	-	-	-
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}, \text{м}$	0,2	0,281	0,331	0,3358	-	-	-
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	0,5	0,468	0,413	0,3358	-	-	-
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	1,165	1,09	0,963	0,782	-	-	-
$r_{\text{др}}, \text{м}$	2,421	2,809	2,981	2,994	-	-	-
α	0,5	0,569	0,7096	0,989	-	-	-
4α	2	2,274	2,839	3,956	-	-	-
$\bar{l}_{\text{э}k}^{\max}$	1	1,5	2	2,5	-	-	-
$\bar{r}_{\text{др}}, \text{м}$	1	1,16	1,231	1,236	-	-	-
$\bar{l}_{\text{т}k}^{\max}$	1	1,401	1,805	2,316	-	-	-
$\hat{l}_{\text{т}k}^{\max}$	1	0,934	0,902	0,926	-	-	-

Таблица 4.5 – Результаты расчетов 6 опыта -
разрез "Медуреченский" (1/2 сибирит-1200 и 1/2 гранулит-НП)

к, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7
$d, \text{м}$	$\leq 0,2$	$0,2 < d \leq 0,4$	$0,4 < d \leq 0,6$	$0,6 < d \leq 0,8$	$0,8 < d \leq 1,0$	$1,0 < d \leq 1,2$	$1,2 < d \leq 1,4$
l_k^{\max}	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
$d_k^{\text{cp}}, \text{м}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
$V_{\text{др}k}, \text{м}^3$	521,64	750,06	277,02	55,08	16,2	-	-
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}, \text{м}^3$	521,64	1271,7	1548,72	1603,8	1620	-	-
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}, \text{м}$	0,1	0,218	0,268	0,283	0,289	-	-
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	0,5	0,545	0,447	0,354	0,289	-	-
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	1,171	1,276	1,047	0,829	0,678	-	-
$r_{\text{др}}, \text{м}$	1,933	2,969	3,263	3,318	3,333	-	-
α	0,5	0,418	0,618	0,912	1,228	-	-
4α	2	1,67	2,471	3,649	4,911	-	-
$\bar{l}_{\text{э}k}^{\max}$	1	2	3	4	5	-	-
$\bar{r}_{\text{др}}, \text{м}$	1	1,536	1,688	1,716	1,725	-	-
$\bar{l}_{\text{т}k}^{\max}$	1	2,049	3,645	7,179	14,53	-	-
$\hat{l}_{\text{т}k}^{\max}$	1	1,024	1,215	1,795	2,906	-	-

Таблица 4.6 – Результаты расчетов 8 опыта -
разрез "Калтанский" (гранулит ТКЗ-15)

к, № фракц.	-	1	2	3	4	5	6
$d, \text{М}$	$\leq 0,2$	$\leq 0,4$	$0,4 < d \leq 0,6$	$0,6 < d \leq 0,8$	$0,8 < d \leq 1,0$	$1,0 < d \leq 1,2$	$1,2 < d \leq 1,4$
l_k^{\max}	-	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
$d_k^{\text{cp}}, \text{М}$	-	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
$V_{\text{др}k}, \text{М}^3$	-	174,96	104,4	37,8	36,72	5,76	0,36
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}, \text{М}^3$	-	174,96	279,36	317,16	353,88	359,64	360
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}, \text{М}$	-	0,2	0,312	0,358	0,415	0,426	0,426
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	-	0,5	0,52	0,448	0,415	0,355	0,305
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	-	1,18	1,228	1,057	0,979	0,837	0,719
$r_{\text{др}}, \text{М}$	-	2,252	2,761	2,916	3,056	3,077	3,079
α	-	0,5	0,461	0,616	0,706	0,91	1,142
4α	-	2	1,845	2,465	2,825	3,64	4,567
$\bar{l}_{\text{ок}}^{\max}$	-	1	1,5	2	2,5	3	3,5
$\bar{r}_{\text{др}}, \text{М}$	-	1	1,226	1,295	1,357	1,366	1,367
$\bar{l}_{\text{Тк}}^{\max}$	-	1	1,456	1,89	2,368	3,115	4,171
$\hat{l}_{\text{Тк}}^{\max}$	-	1	0,971	0,945	0,947	1,038	1,192

Таблица 4.7 – Результаты расчетов 9 опыта -
разрез "Калтанский" (гранулит УП-1Б)

к, № фракц.	-	1	2	3	4	5	6
$d, \text{М}$	$\leq 0,2$	$\leq 0,4$	$0,4 < d \leq 0,6$	$0,6 < d \leq 0,8$	$0,8 < d \leq 1,0$	$1,0 < d \leq 1,2$	$1,2 < d \leq 1,4$
l_k^{\max}	-	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
$d_k^{\text{cp}}, \text{М}$	-	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
$V_{\text{др}k}, \text{М}^3$	-	108,72	115,92	82,08	43,92	7,56	1,8
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}, \text{М}^3$	-	108,72	224,64	306,72	350,64	358,2	360
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}, \text{М}$	-	0,2	0,355	0,447	0,504	0,516	0,5204
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	-	0,5	0,591	0,559	0,504	0,43	0,372
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	-	1,015	1,2002	1,134	1,023	0,874	0,754
$r_{\text{др}}, \text{М}$	-	1,824	2,512	2,874	3,044	3,072	3,079
α	-	0,5	0,346	0,394	0,492	0,662	0,845
4α	-	2	1,382	1,578	1,969	2,647	3,38
$\bar{l}_{\text{ок}}^{\max}$	-	1	1,5	2	2,5	3	3,5
$\bar{r}_{\text{др}}, \text{М}$	-	1	1,377	1,576	1,669	1,684	1,688
$\bar{l}_{\text{Тк}}^{\max}$	-	1	1,556	2,049	2,741	3,972	5,868
$\hat{l}_{\text{Тк}}^{\max}$	-	1	1,037	1,025	1,096	1,324	1,677

Таблица 4.8 – Результаты расчетов 10 опыта - разрез "Калтанский" (порэмит)

к, № фракц.	-	1	2	3	4	5	6
$d, \text{м}$	$\leq 0,2$	$\leq 0,4$	$0,4 < d \leq 0,6$	$0,6 < d \leq 0,8$	$0,8 < d \leq 1,0$	$1,0 < d \leq 1,2$	$1,2 < d \leq 1,4$
l_k^{\max}	-	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
$d_k^{\text{cp}}, \text{м}$	-	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
$V_{\text{др}k}, \text{м}^3$	-	111,6	151,2	61,92	27	2,16	6,12
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}, \text{м}^3$	-	111,6	262,8	324,72	351,72	353,88	360
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}, \text{м}$	-	0,2	0,373	0,435	0,471	0,475	0,489
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	-	0,5	0,621	0,544	0,471	0,395	0,349
$\hat{d}_{\text{cp}}^{\circ}$	-	1,042	1,294	1,133	0,981	0,824	0,727
$r_{\text{др}}, \text{м}$	-	1,846	2,689	2,946	3,048	3,056	3,079
α	-	0,5	0,305	0,419	0,562	0,764	0,933
4α	-	2	1,221	1,678	2,249	3,057	3,731
$\bar{l}_{\Sigma k}^{\max}$	-	1	1,5	2	2,5	3	3,5
$\bar{r}_{\text{др}}, \text{м}$	-	1	1,457	1,596	1,651	1,656	1,668
$\bar{l}_{\text{т}k}^{\max}$	-	1	1,583	2,191	3,09	4,673	6,749
$\hat{l}_{\text{т}k}^{\max}$	-	1	1,055	1,096	1,236	1,558	1,928

Результаты обработки опытно-промышленных взрывов на разрезах аналогично опытными данным с образцами из полигалитовых пород представлены в виде зависимостей относительных величин среднего и максимального размеров кусков породы с удалением от оси заряда на рисунках 4.1. и 4.2 соответственно.

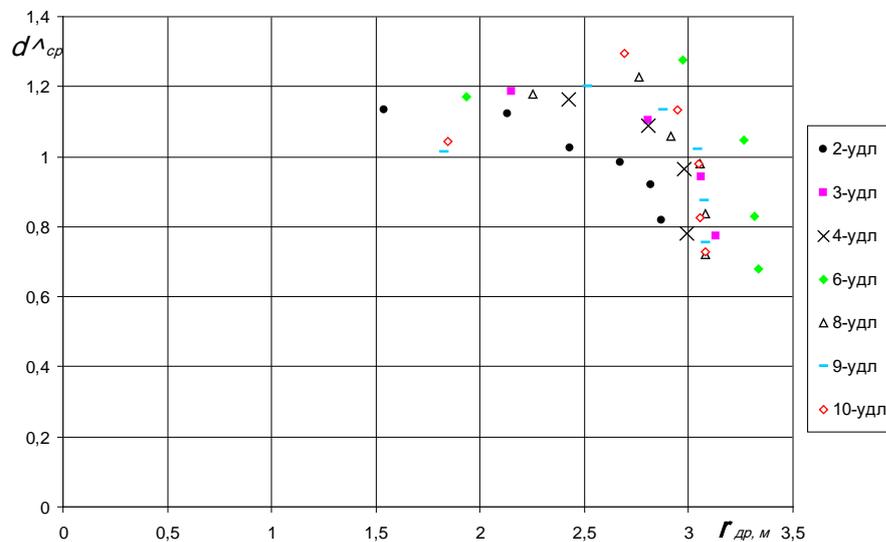


Рисунок 4.1 – Зависимость относительной величины среднего размера куска с удалением от оси заряда.

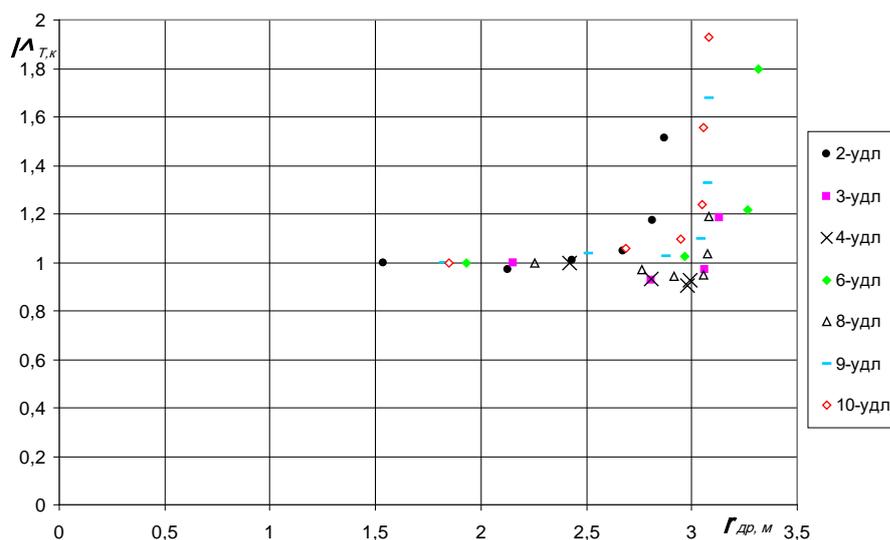


Рисунок 4.2 – Зависимость относительной величины максимального размера куска с удалением от оси заряда.

При этом проанализировав результаты опытно-промышленных взрывов на разрезах по данным М.Н. Оверченко [127] следующим этапом было необходимо и целесообразно проведения опытно-промышленных взрывов ГП с последующим установлением выхода негабарита и среднего размера куска в развале при установлении более точного с наиболее большим числом фракций и максимально достоверного гранулометрического состава взорванного горной массы.

4.2 Методика расчета рациональных параметров буровзрывных работ обеспечивающая заданную степень взрывного дробления горных пород

Методика расчета рациональных параметров БВР обеспечивающая заданную степень взрывного дробления ГП была адаптирована для взрывного дробления железистых кварцитов (Приложение 6 и 7) и известняков (Приложение 3 и 4) с учетом выполненных исследований, приведенных в настоящей диссертационной работе на основе [72].

4.2.1 Расчет параметров взрывного дробления железистых кварцитов

Порода и ее физико-технические параметры:

разрушаемая порода – кварциты; плотность $\rho_n=3,64 \cdot 10^3$ кг/м³;
 модуль Юнга $E=5,16 \cdot 10^{10}$ Па; коэффициент Пуассона $\mu=0,30$;
 предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}=13,2 \cdot 10^7$ Па;
 предел прочности на одноосное растяжение $\sigma_{рас}=12,2 \cdot 10^6$ Па;
 четвертая группа трещиноватости;
 средний размер куска в массиве $d_{ср}=1,18$ м;
 высота уступа $H=15$ м; длина блока $L=71$ м; ширина блока $B=54$ м;
 угол откоса уступа $\alpha=73^\circ$; высота столба воды в скважине $l_{ст.в.}=4$ м.

Буровое оборудование:

станок СБШ-250, шарошечное долото – 244,5 ОК-ПВ.

Параметры ВВ и СИ:

эмульсионное ВВ – «Сибирит-1200»; плотность заряжения $\Delta=1,18 \cdot 10^3$ кг/м³;
 скорость детонации $D=5,5$ км/с; показатель политропы $\gamma=3,14$;
 диаметр заряда $d_{зар}=250$ мм; способ инициирования зарядов — неэлектрическая система инициирования «Нонель»;
 промежуточные детонаторы – шашки ТГ-П850;
 схема инициирования - диагональная; размер негабарита $l_{не}=1$ м.

Вместимость ЭВВ в 1 п.м. скважины:

$$P_{ВВ} = \Delta \cdot \pi \cdot \frac{d_{зар}^2}{4} = 1,18 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \frac{0,25^2}{4} = 57,9 \approx 58 \text{ кг/м} \quad (4.1)$$

W_1 по формуле:

$$W_1 = 0,25 \cdot 5,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{1180}{(3,25+1) \cdot 12,2 \cdot 10^6}} = 6,56 \text{ м} \quad (4.2)$$

Минимальная величина сопротивления по подошве ($W_{ТБ}$) рассчитываем по формуле:

$$W_{ТБ} = C + H \cdot ctg\alpha \quad (4.3)$$

где C – минимальное значение расстояния буримой скважины до бровки уступа, равное 3 м.

Это требование обусловлено правилами техники безопасности буровых работ.

$$W_{TB} = 3 + 15 \cdot \operatorname{ctg} 73 = 7,586 \text{ м.}$$

Поскольку $W_{TB} > W$, то для проработки подошвы уступа по ЛНС в первом ряду размещаются спаренные скважины, пробуренные друг от друга на расстоянии 1 м.

В этом случае используется приближенная оценка:

$$W_2 = \sqrt{2} \cdot W_1 \approx 9,28 \text{ м.} \quad (4.4)$$

Расстояние до бровки уступа составит:

$$C_{pc} = W_2 - W_{TB} + C = 9,28 - 7,586 + 3 = 4,7 \text{ м.} \quad (4.5)$$

Расстояние b между рядами скважин принимается равным:

$$\begin{aligned} b_1 &= W = 6,5 \text{ м.} - \text{ для одиночных скважин} \\ b_2 &= W_P = 9,2 \text{ м.} - \text{ для спаренных скважин} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Число рядов N_b в разрушаемом блоке:

$$N_b = 1 + (B - C_{pc})/b = 1 + (54 - 4,7)/6,5 = 8,585 \approx 9 \text{ рядов} \quad (4.7)$$

Ширина разрушаемого блока:

$$B_p = C_{cp} + b (N_b - 1) = 4,7 + 6,5 (9 - 1) = 56,7 \approx 57 \text{ м} \quad (4.8)$$

Расстояние a между скважинами в ряду принимается равным:

$$\begin{aligned} a_1 &= b_1 = W = 6,5 \text{ м} \\ a_2 &= b_2 = W_P = 9,2 \text{ м} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Число скважин N_a в ряду:

$$N_a = 1 + (L - C_{pc})/a = 1 + (71 - 4,7)/6,5 = 11,2 \approx 11. \quad (4.10)$$

Длина блока:

$$L_p = C_{pc} + (N_a - 1) \cdot a = 4,7 + (11 - 1) \cdot 6,5 = 69,7 \approx 70 \text{ м.} \quad (4.11)$$

Длина перебура:

$$l_{прб} = 0,3 \cdot W = 2 \text{ м} \quad (4.12)$$

Длина забойки:

$$l_{заб} = 0,85 \cdot W = 5,5 \text{ м} \quad (4.13)$$

Длина заряда:

$$l_{зар} = H + l_{прб} - l_{заб} = 15 + 2 - 5,5 = 11,5 \text{ м}, \quad (4.14)$$

где $H + l_{прб} = l_{скв} = 15 + 2 = 17 \text{ м}$ — длина скважины.

Масса заряда в одной скважине:

$$M_{зар} = \Delta \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot l_{зар} \cong 1,18 \cdot 10^3 \cdot \pi \frac{0,0625}{4} \cdot 11,5 \cong 670 \text{ кг}. \quad (4.15)$$

Число скважин в первом ряду:

$$N_1 = \left(\left(\frac{L_p - C_{cp}}{a_2 + 1} \right) + 1 \right) \cdot 2 = \left(\left(\frac{70 - 4,7}{9,2 + 1} \right) + 1 \right) \cdot 2 = 14 \quad (4.16)$$

Число скважин в крайнем ряду:

$$N_2 = \frac{2(B_p - C_{cp})}{a_2 + 1} = \frac{2 \cdot (57 - 4,7)}{9,2 + 1} = 10 \quad (4.17)$$

Общее число скважин $N_{зар}$ на блоке:

$$N_{зар} = N_a \cdot (N_b - 1) + N_1 + N_2 = 112 \quad (4.18)$$

Для инициирования зарядов применяются промежуточные детонаторы в виде шашек ТГ-П850 по 1 шт. в каждой точке инициирования. Поскольку длина заряда более 10 м, то инициирование зарядов осуществляется в двух точках – внизу на расстоянии не менее 1 м от забоя скважины и в верхней части заряда на расстоянии 1 м до забойки. Следовательно, глубина размещения нижнего промежуточного детонатора равна:

$$L_1^{\delta} = l_{ск} - 1 = 17 - 1 = 16 \text{ м} \quad (4.19)$$

а верхнего -

$$L_2^{\delta} = l_{заб} + 1 = 5,5 + 1 = 6,5 \text{ м} \quad (4.20)$$

Расход внутрискважинных КД с интервалом замедления 500 мс составит 224 шт. и соответственно 224 шашки ТГ-П850.

Общее количество ВВ, которое потребуется для взрывного рыхления блока кварцита, равно:

$$Q_{ВВ} = M_{зар} \cdot N_{зар} = 670 \cdot 112 = 75040 \text{ кг}. \quad (4.21)$$

Удельный расход ВВ составит:

$$q_p = \frac{Q_{ВВ}}{H \cdot L_p \cdot B_p} = \frac{75040}{15 \cdot 70 \cdot 57} = 1,25 \text{ кг/м}^3. \quad (4.22)$$

Способ взрывания и параметры короткозамедленного взрывания (КЗВ):

Для ведения ВР на Костомукшском месторождении принимается многорядное КЗВ, позволяющее осуществлять крупномасштабные массовые взрывы. При использовании КЗВ достигается ряд положительных эффектов: повышается равномерность дробления, уменьшается нарушенность законтурной части массива, снижается выход негабарита, уменьшается расход ВВ, сокращается ширина развала и т.д.

Порядок выполнения КЗВ реализуется выбором схемы инициирования зарядов. Для трудно взрывааемых пород при многорядном взрывании наиболее целесообразно считается применение диагональной схемы взрывания зарядов.

В качестве замедлителей при КЗВ используются поверхностные соединительные блоки НОНЕЛЬ Снэплайн.

Время прихода взрывной волны от одной скважины к другой (расположенных в одной ступени замедления) составляет:

$$t_1 = \sqrt{2} \cdot a / C_1 = 2,1 \text{ мс} \quad (4.23)$$

где $C_1 = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho_{np} \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} = 4,37 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

Таким образом, время замедления должно быть $\tau_{зм} > 2,1 \text{ мс}$. Поэтому из номинальных значений $\tau_{зм}$ на Костомукшском месторождении принимаются $\tau_{зм} \geq 17 \text{ мс}$, обеспечивающие независимое разрушение породы взрывом каждого заряда.

Для выполнения инициирования зарядов потребуются поверхностные соединительные блоки НОНЕЛЬ Снэплайн в количестве 112 шт.

Радиус зоны регулируемого дробления:

$$b_0 = 0,5 \cdot d_{зар} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{\sigma_{рас}}} = 0,125 \cdot \sqrt{\frac{9,392 \cdot 10^9}{12,2 \cdot 10^6}} = 3,468 \text{ м} \quad (4.24)$$

Это соотношение имеет место при взрыве удлиненного заряда в непрерывной однородной изотропной среде. В реальном трещиноватом массиве вследствие локализации действия взрыва трещинами реальное значение b_0 меньше рассчитанного по (4.24) приблизительно на 10%. В рассматриваемом случае взрыва

«Сибирита-1200» в кварците IV категории трещиноватости с $l_{cp}=1,18$ м получается, что b_0^{pl} будет составлять:

$$b_0^{pl} = 0,9 \cdot b_0 = 0,9 \cdot 3,468 = 3,12 \text{ м} \quad (4.25)$$

Средний размер кусков породы:

$$d_{cp} = l_{кск}^{max} / (2\alpha + 1) \quad (4.26)$$

где $l_{кск}^{max}$ - максимальный размер кусков во всей зоне регулируемого дробления породы;

α - характерный для каждой породы параметр, определяющий распределение в ней дефектов по их длине.

Параметры $l_{кск}^{max}$ и α определяются с помощью лабораторных исследований взрывного дробления ГП.

Как правило, на карьерах максимальный размер кусков во всей зоне регулируемого дробления породы – $l_{кск}^{max}$ приближенно определяется как:

$$l_{кск}^{max} = (3 \div 4) d_{cp} \quad (4.27)$$

Здесь хотелось бы отметить, что в зоне регулируемого дробления максимальный размер куска существенно меньше, чем рассчитанный по этой величине. Причем максимальный размер куска в зоне регулируемого дробления меньше на 20-30%, чем тогда, когда есть зона нерегулируемого дробления.

Содержание в массиве кусков размером более 1,2 м при среднем размере кусков в массиве, равном 1,18 м.

а) Строится точка А, соответствующая содержанию $V_{1,0}^{(1,0)}=40\%$ в массиве кусков размером более 1,0 м при среднем размере кусков в массиве, равном $l_{cp}=1,0$ м.

б) Строится точка В, соответствующая содержанию $V_{1,5}^{(1,0)}=10\%$ в массиве кусков размером более 1,5 м при среднем размере кусков в массиве, равном $l_{cp}=1,0$ м.

в) Строится точка С, соответствующая содержанию $V_{1,0}^{(1,5)}=80\%$ в массиве кусков размером более 1,0 м при среднем размере кусков в массиве, равном $l_{cp}=1,5$ м.

г) Строится точка D, соответствующая содержанию $V_{1,5}^{(1,5)}=50\%$ в массиве кусков размером более 1,5 м при среднем размере кусков в массиве, равном $l_{cp}=1,5$ м.

д) Находится точка М содержания в массиве кусков размером более 1,2 м при среднем размере кусков в массиве $l_{cp}=1,0$ м.

$$V_{1,2}^{(1,0)} = V_{1,5}^{(1,0)} + \frac{V_{1,0}^{(1,0)} - V_{1,5}^{(1,0)}}{0,5} \cdot 0,3 = 28\% \quad (4.28)$$

е) Находится точка N содержания в массиве кусков размером более 1,2 м при среднем размере кусков в массиве $l_{cp}=1,5$ м.

$$V_{1,2}^{(1,5)} = V_{1,5}^{(1,5)} + \frac{V_{1,0}^{(1,5)} - V_{1,5}^{(1,5)}}{0,5} \cdot 0,3 = 68\% \quad (4.29)$$

ж) Находится точка F содержания в массиве кусков размером более 1,2 м при среднем размере кусков в массиве $l_{cp}=1,18$ м.

$$V_{1,2}^{(1,18)} = 28 + \frac{68 - 28}{0,5} \cdot 0,18 = 42,4\% \quad (4.30)$$

Таким образом, в массиве с $l_{cp}=1,18$ м до взрывного нагружения содержание негабарита (+1,2 м) составляло 42,4% (рисунок 4.3).

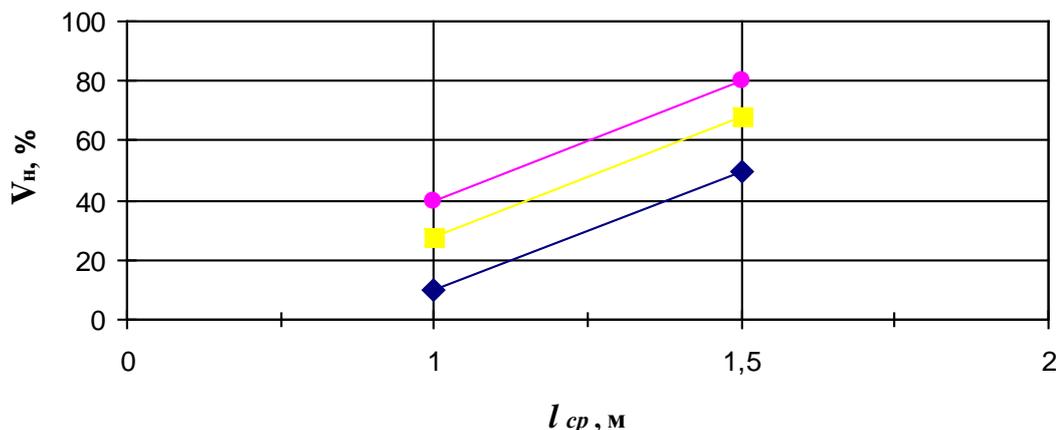


Рисунок 4.3 – Графическая интерпретация выполненного расчета.

Объем породы, приходящейся на 1 скважинный заряд, равен:

$$V_1 = H \cdot a \cdot b = 15 \cdot 6,5 \cdot 6,5 = 633,75 \text{ м}^3 \quad (4.31)$$

Объем породы, соответствующий её регулируемому дроблению взрывом 1 скважинного заряда, составляет:

$$V_{p.d.} = H \cdot 2b_0^{pl} \cdot 2b_0^{pl} + \frac{4}{3}\pi(b_0^{pl})^3 = 15 \cdot 6,24 \cdot 6,24 + \frac{4}{3}\pi \cdot (3,12)^3 = 711,28 \text{ м}^3 \quad (4.32)$$

Известно, что в зоне регулируемого дробления породы негабарит не формируется. Поэтому при принятых параметрах БВР (таблица 4.9) при объеме $V_{p.d.} > V_1$ выхода негабарита из основной части разрушаемого блока не будет.

Таблица 4.9 – Параметры ВР железистых кварцитов

	Показатели	Едн. изм.	Базовый вариант	Предлагаемый вариант
1.	диаметр скважин	мм	250	250
2.	емкость ЭВВ в 1 п.м. скважины	кг/м	58	58
3.	высота уступа	м	15	15
4.	сетка скважин	м	7×7	6,5×6,5
5.	длина перебура	м	3	2
6.	длина забойки	м	5,5	5,5
7.	длина заряда	м	12,5	11,5
8.	длина скважины	м	18	17
9.	масса заряда в одной скважине	кг	725	670
10.	удельный расход ВВ	кг/м ³	1,2	1,25
11.	плотность заряжения	кг/м ³	1,18	1,18
12.	выход негабарита	%	3	<1
13.	средний размер кусков в развале	м	1,18	1,06

В результате корректировки параметров ВР в проведенных расчетах получено:

1. при взрывании скважных зарядов с предлагаемыми параметрами не будет наложения полей напряжений;
2. будет происходить полное разрушение породы;
3. выход негабарита будет меньше 1%.

В этом случае действительно зафиксировано снижение выхода негабарита до 1-2% с уменьшением среднего размера куска во взорванной горной массе на 5÷10% (Приложение 8).

4.2.2 Опытнo-промышленные исследования взрывного дробления известняков

Порода и ее физико-технические параметры:

разрушаемая порода – известняк; плотность $\rho_{пор}=2,36 \cdot 10^3$ кг/м³;

предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сжс}=7,84 \cdot 10^7$ Па;

предел прочности на одноосное растяжение $\sigma_{рас}=5,26 \cdot 10^6$ Па;

VII группа крепости пород по СНИП;

средний размер куска в массиве $l_{ср}=1,0$ м;

высота уступа $H=12$ м; длина блока $L=21$ м; ширина блока $B=7$ м;

угол откоса уступа $\alpha=75^\circ$; порода необводнена.

Буровое оборудование:

буровые станки (пневмоударного бурения) СБУ-100.

Параметры ВВ и СИ:

ВВ – Гранулит РП; плотность заряжания $\Delta=0,75 \cdot 10^3$ кг/м³;

скорость детонации $D=3,5$ км/с; показатель политропы $\gamma=2,8$;

диаметр заряда $d_{зр}=0,11$ м;

способ инициирования зарядов — электрический, с использованием ЭДЗИ (с возможным использованием внутрискважинных детонаторов неэлектрической системы инициирования «Эдилин») с применением промежуточных детонаторов, опущенных в скважину;

промежуточные детонаторы – шашки Т-400Г, Гранулит РП (измельченный, 3 кг), аммонал-200 и аммонит бЖВ;

схема инициирования – порядная; размер негабарита $l_{не}=0,6$ м.

Предлагаемые параметры размещения скважин на уступе рассчитаны по (4.34) и (4.37) в виде $a = b = a_0 \sqrt{P_{ж} / \kappa_3 \sigma_{рас}} = 2,4$ м.

Вместимость ВВ в 1 п.м. скважины:

$$P_{ВВ} = \Delta \cdot \pi \cdot \frac{d_{зр}^2}{4} = 0,75 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \frac{0,11^2}{4} = 7,12 \text{ кг/м} \quad (4.33)$$

W по формуле:

$$W = 0,11 \cdot 3,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{750}{(2,8 + 1) \cdot 5,26 \cdot 10^6}} = 2,4 \text{ м} \quad (4.34)$$

Минимальная величина сопротивления по подошве (W_{TB}) рассчитываем по формуле:

$$W_{TB} = C + H \cdot ctg\alpha \quad (4.35)$$

где C - минимальное значение расстояния буримой скважины до бровки уступа, при необработанной горной массе в забое, равное 2 м.

Это требование обусловлено правилами техники безопасности буровых работ.

$$W_{TB} = 2 + 12 \cdot ctg75 = 5,215 \text{ м.}$$

Поскольку $W_{TB} > W$, то для проработки подошвы уступа по ЛНС в первом ряду размещаются спаренные скважины, пробуренные друг от друга на расстоянии 1 м.

В этом случае, принимаем:

$$W_p = W_{TB} = 5,2 \text{ м.}$$

Расстояние до бровки уступа составит:

$$C_{pc} = W_p - W_{TB} + C = 5,2 - 5,2 + 2 = 2 \text{ м} \quad (4.36)$$

Расстояние b между рядами скважин принимается равным:

$$\begin{aligned} b_1 &= W = 2,4 \text{ м.} - \text{ для одиночных скважин} \\ b_2 &= W_p = 5,2 \text{ м.} - \text{ для спаренных скважин} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Число рядов N_b в блоке, подлежащему разрушению:

$$N_b = 1 + (B - C_{pc})/b = 1 + (7 - 2)/2,4 = 3 \text{ ряда} \quad (4.38)$$

Ширина разрушаемого блока:

$$B_p = C_{pc} + b (N_b - 1) = 2 + 2,4 (3 - 1) = 6,8 \text{ м.} \quad (4.39)$$

Расстояние a между скважинами в ряду принимается равным:

$$a_1 = b_1 = W = 2,4 \text{ м.} \quad (4.40)$$

$$a_2 = b_2 = W_p = 5,2 \text{ м.}$$

Число скважин N_a в ряду:

$$N_a = 1 + (L - C_{pc})/a = 1 + (21 - 2)/2,4 = 8,916 \approx 9. \quad (4.41)$$

Длина блока:

$$L_p = C_{pc} + (N_a - 1) \cdot a = 2 + (9 - 1) \cdot 2,4 = 21,2 \text{ м.} \quad (4.42)$$

Длина перебура:

$$l_{np\bar{b}} = 0,3 \cdot W = 0,7 \text{ м.} \quad (4.43)$$

Длина забойки:

$$l_{за\bar{b}} = 0,85 \cdot W = 2 \text{ м.} \quad (4.44)$$

Длина заряда:

$$l_{зар} = H + l_{np\bar{b}} - l_{за\bar{b}} = 12 + 0,7 - 2 = 10,7 \text{ м.} \quad (4.45)$$

где $H + l_{np\bar{b}} = l_{скв} = 12 + 0,7 = 12,7 \text{ м}$ — длина скважины.

Масса заряда в одной скважине:

$$M_{зп} = \rho_{ВВ} \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot l_{зп} \cong 0,75 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \frac{0,0121}{4} \cdot 10,7 = 76,26 \text{ кг.} \quad (4.46)$$

Количество мешков ВВ (если гранулит РП поставляется в мешках емкостью 40 кг), которое необходимо засыпать в каждую скважину:

$$N_{ми} = \frac{M_{зп}}{40} = \frac{76,26}{40} = 1,9065 \approx 2 \text{ меш.} \quad (4.47)$$

Таким образом, общая масса заряда в скважине составит $M_{зп} = 80 \text{ кг}$.

Число скважин в первом ряду:

$$N_1 = \left(\left(\frac{L_p - C_{cp}}{a_2 + 1} \right) + 1 \right) \cdot 2 = \left(\left(\frac{21,2 - 2}{5,2 + 1} \right) + 1 \right) \cdot 2 = 8 \quad (4.48)$$

Число скважин в крайнем ряду:

$$N_2 = \frac{2(B_p - C_{cp})}{a_2 + 1} = \frac{2 \cdot (6,8 - 2)}{5,2 + 1} = 2 \quad (4.49)$$

Общее число скважин $N_{зар}$ на блоке:

$$N_{зар} = N_a \cdot (N_b - 1) + N_1 + N_2 = 28. \quad (4.50)$$

Для инициирования зарядов применяются промежуточные детонаторы в виде шашек Т-400Г по 1 шт. в каждой точке инициирования. Поскольку длина заряда более 10 м, то инициирование зарядов осуществляется в двух точках – внизу на расстоянии не менее 1 м от забоя скважины и в верхней части заряда на расстоянии 1 м до забойки. Следовательно, глубина размещения нижнего промежуточного детонатора равна:

$$L_1^{\bar{}} = l_{скв} - 1 = 12,7 - 1 = 11,7 \text{ м}, \quad (4.51)$$

а верхнего -

$$L_2^{\bar{}} = l_{зб} + 1 = 2 + 1 = 3 \text{ м}. \quad (4.52)$$

При использовании неэлектрической системы инициирования расход внутрискважинных КД с интервалом замедления 500 мс составит $28 \times 2 = 56$ шт. и соответственно $28 \times 2 = 56$ шашек.

Общее количество ВВ, которое потребуется для взрывного рыхления блока, равно:

$$Q_{ВВ} = M_{зар} \cdot N_{зар} = 80 \cdot 28 = 2240 \text{ кг}. \quad (4.53)$$

Удельный расход ВВ составит:

$$q_p = \frac{Q_{ВВ}}{H \cdot L_p \cdot B_p} = \frac{2240}{12 \cdot 21,2 \cdot 6,8} = 1,2 \text{ кг/м}^3. \quad (4.54)$$

Способ взрывания и параметры КЗВ:

Для ведения ВР принимаем КЗВ, которое позволяет создать увеличения действия волн напряжений на массив. При использовании КЗВ повышается равномерность дробления, уменьшается нарушенность массива от предыдущего взрыва, снижается выход негабарита, уменьшается расход ВВ на 10÷15%, сокращается ширина развала в 1,2÷1,3 раза.

Порядок КЗВ в пространстве реализуется выбором схемы взрывания. Для взрывааемых пород при порядном взрывании наиболее подходит волнообразная схема взрывания.

В качестве замедлителей при КЗВ принимаем электродетонаторы защищенные индукционных – ЭДЗИ.

Время прихода взрывной волны от одной скважины к другой расположенные в одном ряду:

$$t_1 = a / c_1 = 0,48 \text{ мс}, \quad (4.55)$$

где $c_1 = 5000 \text{ м/с}$.

Таким образом, время замедления должно быть $\tau_{з.м1} \geq 3 \text{ мс}$.

Время прихода взрывной волны от одной скважины к другой расположенные по одной диагонали:

$$t_2 = a \sqrt{2} / c_1 = 0,68 \text{ мс.} \quad (4.56)$$

Таким образом, время замедления должно быть $\tau_{3м2} \geq 5 \text{ мс}$.

Принимаем интервал замедления – 17, 25 и 42 мс обеспечивающий независимое разрушение породы каждого заряда.

Для выполнения инициирования зарядов применяем ЭДЗИ – электродетонаторов защищенных индукционных $28 \times 2 = 56$ шт., в то числе: мгновенного действия – $10 \times 2 = 20$ шт., с интервалом замедления 17 мс – $5 \times 2 = 10$ шт., с интервалом замедления 25 мс – $9 \times 2 = 18$ шт. и с интервалом замедления 42 мс – $4 \times 2 = 8$ шт.

Радиус зоны регулируемого дробления:

$$b_0 = 0,5 \cdot d_{зр} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{\sigma_{рас}}} = 0,055 \cdot \sqrt{\frac{3,91 \cdot 10^9}{5,26 \cdot 10^6}} = 1,5 \text{ м.} \quad (4.57)$$

Это соотношение имеет место при взрыве удлиненного заряда в непрерывной однородной изотропной среде. В реальном трещиноватом массиве вследствие локализации трещинами действия взрыва около заряда реальное значение b_0 меньше рассчитанного по (4.57) приблизительно на 10-20%. В рассматриваемом случае взрыва гранулита РП в известняке с $l_{cp} = 1,0$ м будем считать, что b_0^{pl} меньше b_0 на 15%. Поэтому получим:

$$b_0^{pl} = 0,85 \cdot b_0 = 0,85 \cdot 1,5 = 1,275 \text{ м.} \quad (4.58)$$

По классификации массивов ГП по трещиноватости (по В.К. Рубцову) содержание в массиве кусков размером более 1,0 м при среднем размере кусков в массиве $l_{cp} = 1,0$ м составляет $V_{1,0}^{(1,0)} = 40\%$.

Объем породы, приходящейся на 1 скважинный заряд, равен:

$$V_1 = H \cdot a \cdot b = 12 \cdot 2,4 \cdot 2,4 = 69,12 \text{ м}^3. \quad (4.59)$$

Объем породы, разрушаемой взрывом 1 скважинного заряда, составляет:

$$V_{раз} = H \cdot 2b_0^{pl} \cdot 2b_0^{pl} + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (b_0^{pl})^3 = 12 \cdot 2,55 \cdot 2,55 + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (1,275)^3 = 86,71 \text{ м}^3. \quad (4.60)$$

Выход негабарита будет равен:

$$V_{1,0}^H = \frac{V_1 - V_{\text{раз}}}{V_1} \cdot V_{1,0}^{1,0} = \frac{69,12 - 86,71}{69,12} \cdot 40 = -10,18\% . \quad (4.61)$$

Очевидно, что негабарита нет.

Параметры ВР при серийных и опытно-промышленном взрыве на карьере «Жуково» ООО «Карбонат» приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Параметры ВР известняков

	Показатели	Единицы измерения	Серийный вариант	Опытно-промышленный взрыв
1.	диаметр скважин	мм	110	110
2.	вместимость ВВ в 1 п.м. скважины	кг/м	7	7
3.	высота уступа	м	12	12
4.	сетка скважин	м	3,5×3,5	2,4×2,4
5.	длина перебура	м	2	0,7
6.	длина забойки	м	2	2
7.	длина заряда	м	12	10,7
8.	длина скважины	м	14	12,7
9.	масса заряда в одной скважине	кг	82	80 (76)
10.	удельный расход ВВ	кг/м ³	0,46*	1,2
11.	плотность заряжения	кг/м ³	0,75	0,75
12.	выход негабарита	%	10	<1
13.	средний размер кусков в развале	м	0,24	0,17

В результате корректировки параметров ВР в проведенных расчетах получено:

1. при взрывании скважных зарядов с предлагаемыми параметрами не будет наложения полей напряжений;
2. будет происходить полное разрушение породы;
3. выход негабарита будет меньше 1%.

В этом случае негабарит формироваться не будет, а средний размер куска в развале будет меньше, чем при серийном взрывании, поскольку он будет определяться только средним размером кусков в зоне регулируемого дробления. Таким образом, в развале не будет негабаритных кусков, имеющих в массиве до взрыва и сохраняющихся после взрыва в зоне нерегулируемого дробления (рисунок 4.4).

* По «Типовому проекту производства БВР» [176] $q = 0,46$ кг/м³ принимается из [2].



Рисунок 4.4 – Опытно-промышленное взрывное дробление известняка.

В соответствии с изложенной выше теорией рассчитаем ориентировочно выход негабарита при серийном взрывании. В этом случае при взрыве удлиненного заряда формируется зона регулируемого дробления $v_{ра} = 2,4^2 l_{зр} = 5,76 l_{зр}$. Общий же объем разрушения приходящийся на взрыв одного заряда $v_{др} = 3,5^2 l_{зр} = 12,25 l_{зр}$. Таким образом, объем зоны нерегулируемого дробления будет равен $v_{нд} = 6,49 l_{зр}$. Следовательно, выход негабарита при серийном взрывании будет равен $v_{н}^+ = \frac{v_{нд}}{v_{др}} \cdot v_c^+ = \frac{6,49}{12,25} \cdot 20 = 10,6\%$, где $v_c^+ = 20\%$ – содержание негабарита в массе до взрыва. Это оценка практически полностью согласуется с результатами серийного взрывания. По предполагаемому варианту размещения зарядов в опытно-промышленном взрыве выход негабарита не должно быть, что действительно и наблюдалось. Для иллюстрации этого факта приведены фотографии развала при опытно-промышленном взрыве (рисунок 4.4), на которых видно, что в это случае на поверхности развала негабарита нет. При экскавации горной массы негабарита не было и внутри развала, а средний размер кусков получился равным $d_{ср} = 0,17$ м (Приложение 9).

Проведенный опытно-промышленный взрыв дробления известняка на карьере «Жуково» подтвердил основные положения разработанной теории дробления ГП взрывом скважинных зарядов ПВВ на уступах карьеров.

По предложенным параметрам БВР имело место безнегабаритное взрывное дробление известняка с существенным снижением (на 30%) среднего размера куска в развале до $d_{ср} = 0,17$ м. При серийном же взрывании выход негабарита составляет 10% при среднем размере кусков в развале $d_{ср} = 0,24$ м.

4.3 Проект добычи полигалитовых пород

Шарлыкской площади с помощью скважинной технологии

В настоящее время известны многочисленные залежи твердых полезных ископаемых, расположенных на больших глубинах $H > 600$ м шахтные добычи, кото-

рых экономически не целесообразны: натриевые и калийные соли, фосфаты и т.д. К таким же категориям могут относиться месторождения других твердых полезных ископаемых, расположенных на глубинах 1500 м и более.

Для добычи полезных ископаемых в этом случае разрабатываются различные скважинные способы с растворением, выплавлением, вымыванием и т.д. В последние годы предложен новый способ скважинной добычи полезных ископаемых с использованием взрывного дробления пород (патенты №2111359 [130], №2169939 [131], №2186208 [132]). Суть этого способа заключается в том, что с поверхности проходится добычная скважина, постепенно искривляющаяся переходящая из вертикальной в горизонтальную, которая и проходится в добычном слое породы. Путем взрыва заряда ПВВ в горизонтальной части скважины осуществляется дробление добычного слоя породы. Затем в скважину опускается добычной агрегат, с помощью которого эрлифтом извлекается из скважины раздробленная взрывом горная масса на поверхность.

Для технико-экономических оценок и применимости этого способа необходимо знать закономерности взрывного дробления, разрабатываемого твердого полезного ископаемого.

К настоящему времени ни в справочниках, ни в монографиях, ни в других литературных и нормативных документах нет методик расчета степени дробления пород при камуфлетных взрывах удлиненных зарядов. Этим обстоятельством и обусловлено дальнейшее развитие ФКСВ (феноменологической квазистатическо-волновой) теории для разработки оценок степени дробления пород и методик расчета размеров зон заданного дробления породы на разных расстояниях от взрывающегося удлиненного заряда ПВВ.

Результаты теоретических, лабораторных и экспериментальных исследований позволили разработать соответствующие методики, которые и приводятся в «ПРОГНОЗНЫХ ОЦЕНКАХ размеров зон разной степени разрушения полигалитовых пород при взрывах удлиненных зарядов ПВВ на больших глубинах» (Приложение 10 и 11) и изложены ниже в настоящей диссертации.

4.3.1 Прогнозные оценки степени взрывного дробления полигалитовых пород при взрыве горизонтальной части вертикально-горизонтальной скважины

Для выполнения указанных оценок необходимо знать следующие параметры физико-технических свойств полигалитовых пород: ρ - плотность, кг/м³; E - модуль упругости, Па; μ - коэффициент Пуассона; $\sigma_{сж}$ - предел прочности на одноосное сжатие, Па; $\tau_{сдв}$ - предел прочности на сдвиг, Па; $\sigma_{рас}$ - предел прочности на одноосное растяжение, Па.

На основании результатов лабораторных исследований и теоретического обобщения взрывного дробления образцов из полигалитовых пород было установлено, что их интенсивное мелкодисперсное дробление соответствует формированию частиц размерами до 0,5 мм в зоне $r \leq b_*$.

С удалением от взорванного заряда, т.е. при $r > b_*$ начинается новый процесс дробления пород - разрушение клиновидных секторов с формированием частиц размером существенно больше чем 0,5 мм. Это обстоятельство позволило надежно зафиксировать b_* принимаемое как первое опорное значение $r_{он}$, при описании распределения кусков во взорванной массе породы.

В таблице 4.11 приведены значения радиусов $r_{он, l} = b_*$ для описываемых опытов по результатам выполненных экспериментов изложенных в главе 3 настоящей диссертации.

Приближенно на основе анализа прочностных характеристик полученных разными авторами в результате экспериментальных исследований очень большого количества пород, и собранных в фундаментальной работе [169] принято, что пределы прочности пород на сдвиг $\tau_{сдв}$ описываются следующим корреляционным соотношением:

$$\tau_{сдв} = 0,25\sigma_{сж} \cdot \quad (4.62)$$

Приведенные в таблице 4.11 значения $\sigma_{сж}$ и $\sigma_{рас}$ показывают, что эти пробы для разных полигалитовых пород имеют существенно разные значения пределов

прочности на одноосное сжатие и растяжение, а в соответствии с (4.62) и существенно разные значения предела прочности на сдвиг $\tau_{сдв}$.

Таблица 4.11 – Значения прочностных свойств полигалитовых пород, рассчитанные по результатам взрывного дробления

№ пр.	№ керна	$a_0 \cdot 10^3, \text{ м}$	$Q, \text{ Дж/г}$	$P_{ж} \cdot 10^9, \text{ Па}$	$b_{*} \cdot 10^3, \text{ м}$	$\sigma_{сж,ср} \cdot 10^{-7}, \text{ Па}$	$\sigma_{рас,ср} \cdot 10^{-6}, \text{ Па}$	$\tau_{сдв,ср} \cdot 10^{-6}, \text{ Па}$
1	1/1-4(4)	2	5024	2,757	5,643	2,992	1,84	7,48
1	1/1-4(4)	2	3350	2,251	5,329			
2	2/1-3(3)	2	2512	1,949	5,603	2,8447	2,505	7,112
2	2/1,3-4(3)	2	3350	2,251	5,771			
2	2/2-4(3)	2	5024	2,757	5,80			
3	3/1(2)	1,5	4187	2,466	5,694	2,409	1,59	6,0225
3	3/2(2)	1,5	5024	2,757	4,744			
3	3/3(2)	1,5	2512	1,949	4,125			
3	3/4(2)	1,5	3350	2,251	4,971			
4	4/1(2)	2,5	5024	2,757	6,053	4,6805	3,125	11,70125
4	4/2(3)	2	5024	2,757	5,307			
4	4/3(2)	2	3350	2,251	4,159			
5	5/1,3(3)	1,5	2512	1,949	4,864	2,207	1,28	5,5175
5	5/2(1)	2	3350	2,251	8,35			
6	6/1(2)	2	3350	2,251	5,068	3,982	9,87	9,955
6	6/2(2)	2	5024	2,757	5,698			
6	6/3(3)	2	4187	2,466	4,38			

В настоящей диссертации для оценочных расчетов рассмотрены пробы 5, 2 и 4 соответствующие минимальным, средним и максимальным значениям их прочностных свойств.

Прогнозная оценка диаметра зоны разрушения полигалитовых пород с устойчивой кровлей при их взрывной активации:

В прогнозных оценках процесса разрушения полигалитовых пород используются термодинамические характеристики тринитротолуола (ТНТ), которые равны: $\Delta = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $P_{ж} = 1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

Проведенные лабораторные исследования взрывного дробления полигалитовых пород считаем модельными (глава 3 настоящей диссертации), тогда опре-

деляем устойчивый режим разрушения клиновидных секторов по соотношению (4.64), считая, что он имеет место при $r \leq b_\tau$.

$$b_* = 0,5d_{зп}D\sqrt{\frac{\Delta}{(\gamma+1)\sigma_{мд}}}, \text{ м}; \quad (4.63)$$

$$b_\tau = 0,5d_{зп}D\sqrt{\frac{\Delta}{2(\gamma+1)\tau_{сдс}}}, \text{ м}; \quad (4.64)$$

$$b_0 = 0,5d_{зп}D\sqrt{\frac{\Delta}{(\gamma+1)\sigma_{рас}}}, \text{ м}, \quad (4.65)$$

где $d_{зп}$ - диаметр заряда, м;

$\sigma_{мд}$ - напряжение, соответствующее интенсивному мелкодисперсному дроблению пород, равное:

$$\sigma_{мд} = 13\left[1 + 0,079(f - 15) + 0,0019(f - 15)^2\right] \cdot 10^8, \text{ Па}; \quad f \geq 5,5. \quad (4.66)$$

$$\sigma_{мд} = 10\sigma_{сжс}, \text{ Па}; \quad f \leq 5,5. \quad (4.67)$$

Однако, трещинообразование процесс, не детерминированный, а максимальная длина случайных трещин может быть в 2 раза больше детерминированных показателей процессов трещинообразования b_τ (столбец 8, таблица 4.12). Поэтому радиус устойчивого свода полости, формируемой в полигалитовой породе при взрыве в ней заряда ПВВ следует считать равным:

$$l_{уст} = 1,3b_0. \quad (4.68)$$

Значения $l_{уст}$ соответствующие трем указанным выше группам пород, приведены в столбце 2, таблица 4.12.

Прогнозный гранулометрический состав дробления (активации) полигалитовых пород:

Внешние радиусы зон мелкодисперсного дробления полигалитовых пород на частицы размером $\leq 0,5$ мм рассчитываются по соотношениям (4.63) и (4.67) и представлены в столбце 3 таблицы 4.12. При этом гранулометрический состав частиц в зоне мелкодисперсного дробления может быть рассчитан по соотношению:

$$l_q = 0,5\left(\frac{r}{b_*}\right)^{4\alpha_1}, \text{ мм}; \quad r \leq b_* \quad (4.69)$$

Значения α_1 для рассматриваемых пород представлены в столбце 4, таблица 4.12.

За зоной мелкодисперсного дробления формируется зона разрушения клиновидных секторов. Будем считать, что, как и в лабораторных исследованиях устойчивый процесс такого разрушения при опытно-промышленном взрыве будет иметь при размерах частиц $d_{\text{ч}} \geq 0,5$ мм, которому соответствует второе опорное значение $r_{on,2}$.

В приведенных лабораторных опытах отношение $k_{on} = r_{on,2}/r_{on,1}$ было стабильным для каждого типа полигалитовых пород, при этом разброс опытных данных не превышал нескольких процентов. Значения этого отношения приведены в столбце 5, таблица 4.12. При этом гранулометрический состав раздробленных пород в зоне дробления клиновидных секторов будет описываться соотношением:

$$l_{\text{ч}} = 5 \left(\frac{r}{r_{on,2}} \right)^{4\alpha_2}, \text{ мм} \quad r \geq r_{on,1} \quad (4.70)$$

Значения α_2 по результатам лабораторных исследований для рассматриваемых пород представлены в столбце 7 таблицы 4.12.

Таким образом, по соотношениям (4.69) и (4.70) может быть рассчитано содержание любых кусков фракций на разных расстояниях от оси зарядов в раздробленной взрывом массе полигалитовых пород.

Прогнозные радиусы r_{40} зон дробления полигалитовых пород, в которых размер кусков не превышал $l_{\text{кск}} = 40$ мм, рассчитывались по соотношению:

$$r_{40} = (8)^{\frac{1}{4\alpha_2}} \cdot r_{on,1} \cdot k_{on} \quad (4.71)$$

Значения r_{40} для указанных трех проб представлены в столбце 9, таблица 4.12.

Таблица 4.12 – Прогнозные размеры b_* , b_{τ} , r_{40} разных зон разрушения полигалитовых пород

№ пробы	$l_{\text{усм}}$, м	$b_* = r_{on,1}$	α_1	k_{on}	$r_{on,2}$	α_2	b_{τ}	r_{40}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	9,7717	0,572	0,41	3,2255	1,845	0,440	2,56	6,013
2	6,9851	0,504	0,527	2,7579	1,39	0,470	2,25	4,201
4	6,2539	0,393	0,535	2,2977	0,903	0,440	2,76	2,943

Выводы по главе 4

1. Результаты расчетов указанных распределений гранулометрического состава хорошо согласуются с опытными данными.

2. Установленные и предложенные соотношения для главных критериев взрывного дробления ГП на карьерах (выход негабарит и средний размер кусков породы в развале) удовлетворительно согласуются с результатами промышленного ведения ВР и позволяют определять условия безнегабаритного взрывного дробления ГП на карьерах.

3. Разработаны Рекомендации по рациональным параметрам взрывного дробления ГП на карьерах.

4. Разработана методика и последовательность расчета прогнозных оценок гранулометрического состава во взорванной горной массе и средний размер ее кусков в зависимости от свойств разрушаемых пород и параметров удлиненных зарядов ПВВ.

5. Разработан предварительный проект ведения ВР по взрывной активации полигалитовых пород в вертикальной скважине, который позволил точно рассчитать размеры зон заданной степени дробления полигалитовых пород при разработке специального проекта ВР для взрывного дробления этих пород в горизонтальной части горизонтально-вертикальной скважины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной задачи по определению степени дробления горных пород при их взрывном дроблении на карьерах – установление закономерностей разрушения взрывом удлиненных зарядов промышленных взрывчатых веществ горных пород на уступах карьеров позволившей разработать методики расчета параметров размещения взрывных скважин на разрушаемом блоке, обеспечивающие заданную степень взрывного дробления пород.

По результатам выполненных исследований сформулированы следующие основные выводы:

1. Установлено, что соотношением: $b_* = a_0 \cdot \sqrt{P_{жс} / \sigma_{мд}}$ определяется радиус зоны интенсивного мелкодисперсного дробления пород с размерами частиц до 1 мм, при чем имеет место прямая пропорциональная зависимость между соотношениями характерными радиусами зон мелкодисперсного дробления и зоны дезинтеграции клиновидных секторов.

2. Установлено, что для исключения выхода негабарита из основной части взрываемого уступа необходимо, чтобы расстояния между зарядами a было равно $2b_0$, а расстояние между рядами зарядов $b=2b_0$ при исключении взаимного влияния одновременно взрываемых зарядов на процесс разрушения ими породы.

3. Установлены обобщающие закономерности формирования гранулометрического состава в развале при взрывном дроблении горных пород в зависимости от физико-технических свойств пород, конструктивных параметров зарядов и давления газообразных продуктов в детонационной волне.

4. Установлена закономерность формирования кусков в зоне дробления клиновидных секторов с учетом прочностных свойств пород, диаметра заряда и детонационных характеристик взрывчатых веществ.

5. Разработана модель процесса разрушения в зоне радиального трещинообразования, по которой внешний радиус зоны дезинтеграции клиновидных секторов имеет место при значениях радиальных сжимающих напряжений.

6. Опираясь на Феноменологическую квазистатическо-волновую теорию В.Н. Родионова о крупномасштабном подземном взрыве и статистическое распределение напряжений в близи зарядной полости, установлена теоретическая закономерность изменения среднего размера куска в развале для описания степени дробления пород, зависящая от параметров α , $l_{оп}$ и $r_{оп}$, характеризующих строения горных пород.

7. Разработана методика расчета рациональных параметров сетки скважин и конструкций зарядов промышленных взрывчатых веществ для взрывного дробления горных пород с учетом прочностных свойств пород с целью уменьшения среднего размера куска породы в развале.

8. Разработана методика проведения экспериментальных опытно-лабораторных исследований, позволяющих надежно определять параметры α , $l_{оп}$ и $r_{оп}$, которые характеризуют особенности строения пород.

Следует отметить, что при опытно-промышленном взрывании на Мончаловском месторождении известняков на карьере «Жуково» и на карьерах ОАО «Карельский окатыш» получена удовлетворительная согласованность результатов с теоретическими оценками.

На основе исследований, выполненных в диссертации, разработаны:

- «ПРОГРАММА И МЕТОДИКА оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном дроблении негабаритов железистых кварцитов»;

- «РЕКОМЕНДАЦИИ по рациональным параметрам взрывного дробления железистых кварцитов на Костомукшском месторождении железистых кварцитов на карьерах ОАО «Карельский окатыш»»;

- «ПРОГРАММА И МЕТОДИКА оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном дроблении негабаритов известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»»;

- «РЕКОМЕНДАЦИИ по рациональным параметрам безнегабаритного взрывного дробления известняков на Мончаловском месторождении известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»»;

- «Руководство по выполнению практических занятий по дисциплине: «Математические методы моделирования и расчеты на ЭВМ»»;

- «Руководство по выполнению лабораторно-практических занятий по дисциплине: «Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании»»;

- «ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ размеров зон разной степени разрушения полигалитовых пород при взрывах удлиненных зарядов ПВВ на больших глубинах»».

«РЕКОМЕНДАЦИИ по рациональным параметрам взрывного дробления железистых кварцитов на Костомукшском месторождении железистых кварцитов на карьерах ОАО «Карельский окатыш»» принятые к использованию на карьерах ОАО «Карельский окатыш», позволили скорректировать параметры БВР при промышленном ведении ВР на Костомукшском месторождении железистых кварцитов и дали положительные результаты по снижению среднего размера куска в развале.

«РЕКОМЕНДАЦИИ по рациональным параметрам безнегабаритного взрывного дробления известняков на Мончаловском месторождении известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»» были использованы для проведения опытно-промышленного взрыва в Тверской области на карьере «Жуково» Мончаловского месторождения известняков и позволили достичь заметного снижения среднего размера куска в развале при практически 0% выходе негабарита.

«Руководства по выполнению практических занятий по дисциплине: «Математические методы моделирования и расчеты на ЭВМ»» и «Руководства по выполнению лабораторно-практических занятий по дисциплине: «Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании»» были использованы в 2006-2008 гг.

при проведении лабораторных и практических занятий со студентами горных специальностей.

«ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ размеров зон разной степени разрушения полигалитовых пород при взрывах удлиненных зарядов ПВВ на больших глубинах» были приняты ФГУП «ЦНИИГеолнеруд» и впервые позволили точно рассчитать размеры зон заданной степени дробления полигалитовых пород при взрыве удлиненных зарядов тротила в горизонтальной части вертикально-горизонтальной скважины по разработанной в институте модификации скважинного способа гидродобычи. Полученные параметры зон дробления позволили спрогнозировать объем извлекаемых полигалитовых пород, рассчитать рентабельность данного способа и наметить величину минимальной промышленной мощности пласта при обосновании кондиций на запасы данных пород.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

Рецензируемые журналы, входящие в перечень ВАК РФ:

1. Крюков Г.М., Стадник В.В., **Докутович М.И.** Гранулометрический состав горной массы в зоне регулируемого дробления пород взрывом. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 2. – М.: МГГУ, 2007. – С. 34-42.

2. Крюков Г.М., **Докутович М.И.**, Жаворонко С.Н. Главные критерии для оценки взрывного дробления горных пород на карьерах. // Взрывное дело: Сб. научных трудов / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2007. – № ОВ7. – М.: Издательство «МИР ГОРНОЙ КНИГИ», 2007. – С. 180-195.

3. Крюков Г.М., **Докутович М.И.**, Жаворонко С.Н. Теоретическая оценка среднего размера куска в зоне регулируемого дробления горных пород взрывом. // Взрывное дело: Сб. научных трудов / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2007. – № ОВ7. – М.: Издательство «МИР ГОРНОЙ КНИГИ», 2007. – С. 196-199.

4. Крюков Г.М., **Докутович М.И.** Прогнозные оценки для двух основных критериев взрывного дробления горных пород на карьерах. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2008. – № 1. – Екатеринбург: УГГУ, 2008. – С. 78-87.

5. Крюков Г.М., **Докутович М.И.** Сопоставление теоретических оценок дробления горных пород взрывом с результатами опытного дробления отдельностей известняка на карьере. // Научно-технический сборник Взрывное дело. Выпуск №101/58. Теория и практика взрывного дела. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2009. – С. 25-37.

6. **Докутович М.И.** Результаты опытно-промышленных исследований взрывного дробления негабаритов известняка. // Горный информационно-

аналитический бюллетень. – 2011. – № 4. – М.: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2011. – С. 382-389.

7. Крюков Г.М., **Докутович М.И.**, Жаворонко С.Н. Степень дробления и выход негабарита при взрывном рыхлении горных пород на карьерах. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 5. – М.: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2011. – С. 347-351.

8. Сенченко Д.С., **Докутович М.И.** Геоэкологические аспекты взрывных работ на месторождениях известняка. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 8. – М.: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2014. – С. 215-220.

9. **Докутович М.И.** Теоретические оценки детерминированных закономерностей степени дробления горных пород под воздействием взрыва каждого заряда промышленных взрывчатых веществ. // Инженерная физика. – 2019. – № 5. – М.: ООО Изд-во «Научтехлитиздат», 2019. – С. 46-53.

В других изданиях:

10. **Krjukov G.M.**, **Stadnik V.V.**, **Dokutovich M.I.** Theoretical estimates of the determined regularities of extent of crushing of rocks as a result of explosion of larch charge of industrial explosive (Laboratory and industrial researches). // 7th world conference on explosives & blasting EFEE 2013. – М.: EFEE, Alliance Press Ltd., 2013 – Part II., pp. 118-121.

11. **Докутович М.И.** Теоретическое обоснование регулирования гранулометрического состава взорванной горной массы при ведении буровзрывных работ. // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Под редакцией академика К.Н. Трубецкого. / Материалы 3-й Конференции Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2018. – С. 117-119.

12. Айнбиндер И.И., Жариков И.Ф., **Докутович М.И.** К вопросу оценки главных критериев взрывного рыхления вскрышных пород на карьерах примени-

тельно к требованиям эффективной работы комплексов циклично-поточной технологии при ведении буровзрывных работ на больших глубинах. // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. / Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М.: ИПКОН РАН, 2019. – С. 57-60.

13. **Докутович М.И.** Результаты практического применения теории разрушения горных пород взрывом. // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Под редакцией академика РАН К.Н. Трубецкого. / Сборник статей 4-й Конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2020. – С. 122-124.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АГН – Академия горных наук;
- Акад. – академик;
- АН СССР – Академия наук СССР;
- АНО НОИВ – Автономная некоммерческая организация «Национальная организация инженеров-взрывников»;
- АС – аммиачная селитра;
- асп. – аспирант;
- БВР – буровзрывные работы;
- БВЦ – буровзрывной цех;
- ВАК – Высшая аттестационная комиссия;
- ВВ – взрывчатое вещество;
- ВД – взрывное дело;
- ВМ – взрывчатые материалы;
- ВНИИцветмет – Всесоюзный научно-исследовательский институт цветной металлургии;
- ВНИМИ – Всесоюзный научно-исследовательский маркшейдерский институт;
- ВР – взрывные работы;
- ВУЗ – высшее учебное заведение;
- ГД – горное дело;
- ГИАБ – Горный информационно-аналитический бюллетень;
- ГОК – горно-обогатительный комбинат;
- Госгортехнадзор России – Федеральный горный и промышленный надзор России;
- ГОУ – государственное образовательное учреждение;
- ГП – горная порода;
- ГР – горные работы;
- д.г.-м.н. – доктор геолого-минералогических наук;

- ДОФ – дробильно-обогажительная фабрика;
- ДТ – дизельное топливо;
- д.т.н. – доктор технических наук;
- ДШ – детонирующий шнур;
- ЕКВ – Единая книжка взрывника;
- ЕПБ при ВР – Единые правила безопасности при ВР;
- ЗАО – Закрытое акционерное общество;
- ИГД – Институт горного дела;
- ИПКОН РАН – Институт проблем комплексного освоения недр РАН;
- ИФЗ – Институт физики земли;
- ИХФ – Институт химической физики;
- к.г.-м.н. – кандидат геолого-минералогических наук;
- КД – капсуль-детонатор;
- КЗВ – короткозамедленное взрывание;
- КМА – Курская магнитная аномалия;
- к.т.н. – кандидат технических наук;
- ЛНС – линия наименьшего сопротивления;
- ЛСПП – линия сопротивления по подошве;
- ЛЭП – линии электропередач;
- МВК – Межведомственная комиссия;
- МГГУ – Московский государственный горный университет;
- Минобрнауки России – Министерство образования и науки Российской Федерации;
- МТУ – Межрегиональное территориальное управление технологического и экологического надзора;
- НДС – напряженно-деформированное состояние;
- НСИ – неэлектрическая система инициирования;
- ОАО – открытое акционерное общество;
- ОГР – открытые горные работы;
- ОМР – опытно-методические работы;

- ООО – общество с ограниченной ответственностью;
- ОШ – огнепроводный шнур;
- ПВВ – промышленное ВВ;
- ПД – продукты детонации;
- проф. – профессор;
- ПРС – почвенно-растительной слой;
- ПС – пиротехнический состав;
- РАН – Российская академия наук;
- РГПВ – разрушение горных поров взрывом;
- Ростехнадзор – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору;
- РФ – Российская Федерация;
- СБУ – станок буровой ударно-вращательного (пневмоударного) бурения;
- СБШ – станок буровой шарошечный;
- СВ – средства взрывания;
- СЗ – средства заряжания;
- СИ – средства инициирования;
- скв. – скважина;
- СНГ – Содружество Независимых Государств;
- СНиП – строительные нормы и правила;
- СО – сибирское отделение;
- соср. – сосредоточенный заряд;
- СПбГГИ – Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет);
- СПП – сопротивление по подошве уступа;
- СЦВР – специальный цех взрывных работ;
- ТГ-П – шашка-детонатор литая тротило-гексогеновая в полимерном корпусе;
- ТНТ – тринитротолуол;
- ТЭП – технико-экономические показатели;

- УГГУ – Уральский государственный горный университет;
- удл. – удлиненный заряд;
- ФГУП – Федеральное государственное унитарное предприятие;
- ФКСВ – феноменологическая квазистатическо-волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом зарядов ПВВ;
- ФРГП – физика разрушения горных пород;
- ЦНИИГеолнеруд – Центральный научно-исследовательский институт геологии нерудных полезных ископаемых;
- ЦФО – Центральный федеральный округ;
- ЭВВ – эмульсионное ВВ;
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина;
- ЭД – электродетонатор;
- ЭДЗД – электродетонатор замедленного действия;
- ЭДЗИ – электродетонатор защищенный индукционный;
- ЭДКЗ – электродетонатор короткозамедленного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Блейман И.Л., Васильев Г.А. и др. Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1972. – 240 с.
2. Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Гуров Н.В., Кантор В.Х. Нормативный справочник по буровзрывным работам. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 511 с.
3. Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. – М.: Недра, 1993. – 319 с.
4. Азаркович А.Е. и др. Дробление скальных массивов взрывами в практике гидротехнического строительства. – М.: Энергоиздат, 1993. – 144 с.
5. Айнбиндер И.И., Жариков И.Ф., Докутович М.И. К вопросу оценки главных критериев взрывного рыхления вскрышных пород на карьерах применительно к требованиям эффективной работы комплексов циклично-поточной технологии при ведении буровзрывных работ на больших глубинах. // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. / Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М.: ИПКОН РАН, 2019. – С. 57-60.
6. Анистратов Ю.И. Исследования технологических грузопотоков на карьерах со скальными породами. // Диссертационная работа, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени горный институт, 1969. – 356 с.
7. Анистратов Ю.И. Технология открытой добычи руд редких и радиоактивных металлов: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1988. – 430 с.
8. Анистратов Ю.И. Технологические потоки на карьерах (Энергетическая теория открытых горных работ). – М.: «Глобус», 2005. – 304 с.
9. Афонин В.Г., Гейман Л.М., Комир В.М. Справочное руководство по взрывным работам в строительстве. – Киев: Будівильник, 1974. – 382 с.
10. Барон Л.И. Кусковатость и методы её измерения. – М.: Изд. АН СССР, 1969. – 186 с.

11. Барон Л.И., Коняшин Ю.Г., Курбатов В.М. Дробимость горных пород. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 168 с.
12. Барон Л.И., Сиротюк Г.Н. Проверка применимости закона Розина-Раммлера для исчисления среднего куска при взрывном дроблении горных пород // Взрывное дело №62/19. – М.: Недра, 1967. – С. 111-121.
13. Баум Ф.А. Процессы разрушения горных пород взрывом. // Сб. «Взрывное дело» №52/9. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 262-285.
14. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1959. – 792 с.
15. Белаенко Ф.А. Свойства горных пород с точки зрения управления кровлей. – Москва-Ленинград: ОНТИ НКТП СССР Главная редакция горно-топливной литературы, 1936. – 108 с.
16. Белин В.А., Крюков Г.М. Итоги развития теории разрушения горных пород взрывом. // Сб. «Взрывное дело». Выпуск №105/62. Теория и практика взрывного дела. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2011. – С. 3-17.
17. Беляев А.Ф., Садовский М.А. О природе фугасного и бризантного действия взрыва. // Сб. «Физика взрыва». – ч.1. – М.: АН СССР, 1952. – С. 3-20.
18. Бибик И.П. Метод определения оптимальных параметров БВР для технологических потоков карьеров. // Взрывное дело: Сб. научных трудов. / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – №ОВ5. – М.: Издательство «МИР ГОРНОЙ КНИГИ», 2007. – С. 159-166.
19. Бруев В.П. Физико-техническое обоснование импульсной электромагнитной обработки железистых кварцитов с целью их разупрочнения перед измельчением. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГГУ, 2005. – 24 с.
20. Вартанов В.Г. Обоснование параметров буровзрывных работ при проведении параллельных выработок неглубокого заложения. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 25.00.20 / Вартанов Вардан Геннадьевич. – М.: МГГУ, 2007. – 253 с.

21. Веревошкин И.Е. Разработка метода проектирования массовых взрывов на карьерах на основе энергетического принципа расчета параметров зарядов (на примере Стойленского ГОКа). // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: ИПКОН РАН, 2004. – 17 с.

22. Викторов С.Д., Галченко Ю.П., Закалинский В.М., Рубцов С.К. Разрушение горных пород сближенными зарядами. – М.: ООО Изд-во «Научтехлитиздат», 2006. – 276 с.

23. Викторов С.Д., Казаков Н.Н. О крупномасштабной отбойке руды на карьерах. // Физические проблемы разрушения горных пород (Записки Горного института. Т. 171.) – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), 2007. – С. 158-160.

24. Власов О.Е., Смирнов С.А. Основы расчета дробления горных пород взрывом. – М.: Изд. «Акад. наук СССР», 1962. – 200 с.

25. Вопросы теории разрушения горных пород действием взрыва. Сборник статей. Отв. ред. чл.-корр. АН СССР Н.В. Мельников. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 163 с.

26. Гейман Л.М. Взрыв: история, практика, перспективы. – М.: Издательство «Наука», 1978. – 184 с.

27. Глазков Ю.В., Крюков Г.М., Жаворонко С.Н. Теоретические оценки по ФКСВ теории процессов разрушения горных пород камуфлетным взрывом удлиненных зарядов. // Физические проблемы разрушения горных пород (Записки Горного института. Т. 171.) – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), 2007. – С. 91-101.

28. «Годовой информационный отчет» по договору №441/1 за период с 01.01.06 г. по 31.12.06 г. на тему: "Разработка параметров зарядов ПВВ, взрывом которых обеспечивается активация полигалитовых пород в вертикальной скважине и в горизонтальной части вертикально-горизонтальной скважины, специального проекта ВР и его методического обеспечения в процессе ОМР". – М.: МГГУ, 2006. – 47 с.

29. Горная энциклопедия. / Гл. ред. Козловский Е.А.; Ред. кол.: Агошков М.И., Байбаков Н.К., Болдырев А.С. и др. – М.: Сов. энциклопедия. Т. 1. Аа-лава – Геосистема. 1984. – 560 с.

30. Горная энциклопедия. / Гл. ред. Козловский Е.А.; Ред. кол.: Агошков М.И., Байбаков Н.К., Болдырев А.С. и др. – М.: Сов. энциклопедия. Т. 2. Геосферы – Кенай. 1985. – 575 с.

31. Горная энциклопедия. / Гл. ред. Козловский Е.А.; Ред. кол.: Агошков М.И., Байбаков Н.К., Болдырев А.С. и др. – М.: Сов. энциклопедия. Т. 3. Кенган – Орт. 1987. – 592 с.

32. Горная энциклопедия. / Гл. ред. Козловский Е.А.; Ред. кол.: Агошков М.И., Байбаков Н.К., Болдырев А.С. и др. – М.: Сов. энциклопедия. Т. 4. Ортин – Социосфера. 1989. – 623 с.

33. Гриб А.А. // ПММ, № 8, 1944.

34. Демидюк Г.П. Современные теоретические представления о действии взрыва в среде. // В кн.: Буровзрывные работы в горной промышленности. – М.: Госгортехиздат, 1962. – С. 223-240.

35. Демидюк Г.П., Смирнов С.А. К вопросу о механизме дробления пород взрывом. // В кн.: Взрывное дело, № 52/9. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 285-287.

36. Докутович М.И. Оценка эффективности применения программируемого многорядного короткозамедленного взрывания при производстве специальных взрывных работ. // XIV Международная научно-практическая конференция по взрывному делу (г. Порторож, Республика Словения). / Сборник докладов. АНО «Национальная организация инженеров-взрывников». – М.: АНО «НОИВ», ООО «Пресс Бюро», 2014. – С. 47-48.

37. Докутович М.И. Результаты опытно-промышленных исследований взрывного дробления негабаритов известняка. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №4. – М.: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2011. – С. 382-389.

38. Докутович М.И. Теоретические оценки детерминированных закономерностей степени дробления горных пород под воздействием взрыва каждого заряда промышленных взрывчатых веществ. // Инженерная физика. – 2019. – №5. – М.: Издательство «Научтехлитиздат», 2019. – С. 46-53.

39. Докутович М.И. Теоретическое обоснование регулирования гранулометрического состава взорванной горной массы при ведении буровзрывных работ. // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Под редакцией академика К.Н. Трубецкого. // Материалы 3-й Конференции Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2018. – С. 117-119.

40. Докучаев М.М., Родионов В.Н., Ромашов А.Н. Взрыв на сброс. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 108 с.

41. Дополнение к типовому проекту производства буровзрывных работ на карьере «Жуково» ООО «Карбонат». – г. Москва, 2006. – 5 с.

42. Друкованый М.Ф. Методы управления взрывом на карьерах. – М.: Недра, 1973. – 415 с.

43. Друкованый М.Ф., Комир В.М., Кузнецов В.М. Действие взрыва в горных породах. – Киев: Наукова думка, 1973. – 184 с.

44. Друкованый М.Ф., Тартаковский Б.Н., Вишняков В.С., Ефремов Э.И. Влияние дробления пород на эффективность технологических процессов открытой разработки. – Киев: Наукова думка, 1974. – 272 с.

45. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. – 3-е изд. – М.: Недра, 1988. – 385 с.

46. Дугарцыренов А.В. Динамика напряженно-деформированного состояния горных пород при камуфлетном взрыве сосредоточенного заряда. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №4. – М.: МГГУ, 2007. – С. 166-179.

47. Дугарцыренов А.В. К механизму разрушения упругой среды (горной породы) при взрыве сосредоточенного и удлиненного зарядов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №3. – М.: МГГУ, 2008. – С. 12-17.

48. Дугарцыренов А.В. Физическая природа и механизм разрушения горной породы при камуфлетном взрыве. // Научно-технический сборник Взрывное дело. Выпуск №106/63. Теория и практика взрывного дела. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2011. – С. 112-126.

49. Единые правила безопасности при взрывных работах (ПБ 13-407-01). Безопасность при взрывных работах: Сборник документов. Серия 13. Выпуск 1 / Колл. авт. – 2-е изд., испр. и доп. Москва, ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 248 с.

50. Ефремов Э.И. Подготовка горной массы на карьерах. – М.: Недра, 1980. – 271 с.

51. Ефремов Э.И., Вовк А.А. Справочник по взрывным работам. – Киев: Наукова думка, 1983. – 328 с.

52. Ефремов Э.И., Дурнев В.Ф. Исследование производительности экскаваторов в зависимости от гранулометрического состава взорванной горной массы // Информационный листок. – К.: Наукова думка, 1970. – 4 с.

53. Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Пастухов А.И. Прогнозирование дробления горных массивов взрывом. – К.: Наукова думка, 1990. – 120 с.

54. Ефремов Э.И., Харитонов В.Н., Семенюк И.А. Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1979. – 253 с.

55. Жаворонко С.Н. Методы ведения взрывных работ. Учебное пособие для студентов специальности 130408 «Взрывное дело». // Под ред. Белина В.А. // – М.: МГГУ, 2010. – 166 с.

56. Жариков И.Ф. Механическое действие взрыва в упруго-пластичной среде. // Научно-технический сборник Взрывное дело. Выпуск №104/61. Теория и практика взрывного дела. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2010. – С. 50-63.

57. Жариков И.Ф. Проблемы подготовки взорванной горной массы на глубоких горизонтах. // Научно-технический сборник Взрывное дело. Выпуск №120/77. Теория и практика взрывного дела. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2018. – С. 109-121.

58. Иволгин А.И. Созидательные взрывы. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: «Недра», 1975. – 304 с.
59. Казаков Н.Н. Взрывная отбойка руд скважными зарядами. – М.: Недра, 1975. – 192 с.
60. Казаков Н.Н. Разрушение горной породы ударным действием. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1966. – 30 с.
61. Камолов Ш.А. Обоснование способов взрывного рыхления разнопрочных слоев вскрышных пород при разработке пластовых месторождений // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГГУ, 2011. – 24 с.
62. Каркашадзе Г.Г. Физико-техническое обоснование параметров взрывной подготовки рудного массива к выемке на открытых горных работах. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МГГУ, 1995. – 27 с.
63. Клевцов С.А. Повышение эффективности взрывной отбойки трещиноватых горных пород (на примере карьеров АО «Апатит»). // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Апатиты: Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, 1996. – 16 с.
64. Копылов В.С. Обоснование рациональных параметров взрывной отбойки на карьерах по добыче стройматериалов. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: ИПКОН РАН, 2002. – 17 с.
65. Кочанов А.Н. Анализ условий возникновения сверхмалых частиц при взрывном разрушении горных пород. // Физические проблемы разрушения горных пород: Сб. тр. Четвертой международной научной конференции, 18-22 октября 2004 г. – М.: ИПКОН РАН, 2005. – С. 220-222.
66. Кравец Б.Н., Лучко И.А., Михалюк А.В. Использование энергии взрыва в мелиоративном строительстве. – М.: «Недра», 1987. – 208 с.

67. «Краткий информационный отчет» по научно-техническим работам, выполненным в МГГУ на I и II этапах в 2008 г. договора №580/1. – М.: МГГУ, 2008. – 7 с.

68. Крысин Р.С., Новинский В.В. Модели взрывного дробления горных пород: Монография. – Д.: АРТ-ПРЕСС, 2006. – 144 с.

69. Крысин Р.С., Новинский В.В. Теоретические основы описания кусковатости горной массы посредством коэффициента разрыхления // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – Вип. 2 (13). – С. 15-18.

70. Крысин Р.С., Щербаков П.Н. Оптимизация буровзрывных работ на карьерах: Учебное пособие. – Д.: ДГИ, 1992. – 75 с.

71. Крюков Г.М. Закономерности деформирования и разрушения горных пород камуфлетным взрывом сосредоточенного заряда. // Сб. Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород. – М.: ИПКОН РАН, 1999. – С. 89-93.

72. Крюков Г.М. Методические указания и перечень заданий для самостоятельных работ (курсовая работа и практические занятия) по дисциплине «Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании для студентов специальностей 091000 «Взрывное дело». – М.: МГГУ, 2002. – 54 с.

73. Крюков Г.М. Модель взрывного рыхления горных пород. Выход негабарита. Средний размер кусков породы в развале. / Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня №2, Препринт. – М.: МГГУ, 2005. – 30 с.

74. Крюков Г.М. Физика взрывного разрушения. Учебное пособие. – М.: МГИ, 1984. – 72 с.

75. Крюков Г.М. Физика и моменты разных видов разрушения горной породы при взрыве в ней удлиненного заряда ПВВ: Отдельные статьи горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2009. – №3 – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2009. – 48 с.

76. Крюков Г.М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Учебник для вузов. – Т. 1. – М.: Издательство «Горная книга», 2006. – 330 с.

77. Крюков Г.М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Ч. 1. Основы теорий деформации и разрушения горных пород при бурении и взрывании. Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2002. – 134 с.

78. Крюков Г.М., Глазков Ю.В. Модель ФКСВ деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных ВВ. / В сб. "Физические проблемы разрушения горных пород". Труды IV международной научной конференции 18-22 октября 2004 г. Москва. – М.: ИПКОН РАН, 2005. – С. 193-200.

79. Крюков Г.М., Глазков Ю.В. Теоретическая оценка степени взрывного дробления горных пород на карьерах при разных способах инициирования зарядов. / Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня №8, Препринт. – М.: МГГУ, 2003. – 26 с.

80. Крюков Г.М., Глазков Ю.В. Феноменологическая квазистатическо-волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом зарядов промышленных ВВ. / Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня №11, Препринт. – М.: МГГУ, 2003. – 67 с.

81. Крюков Г.М., Докутович М.И. Прогнозные оценки для двух основных критериев взрывного дробления горных пород на карьерах. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2008. – №1. – Екатеринбург: УГГУ, 2008. – С. 78-87.

82. Крюков Г.М., Докутович М.И. Сопоставление теоретических оценок дробления горных пород взрывом с результатами опытного дробления отдельностей известняка на карьере. // Научно-технический сборник Взрывное дело. Выпуск №101/58. Теория и практика взрывного дела. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2009. – С. 25-37.

83. Крюков Г.М., Докутович М.И., Жаворонко С.Н. Главные критерии для оценки взрывного дробления горных пород на карьерах. // Взрывное дело: Сб. научных трудов / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического

бюллетеня. – 2007. – №ОВ7. – М.: Издательство «МИР ГОРНОЙ КНИГИ», 2007. – С. 180-195.

84. Крюков Г.М., Докутович М.И., Жаворонко С.Н. Степень дробления и выход негабарита при взрывном рыхлении горных пород на карьерах. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №5. – М.: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2011. – С. 347-351.

85. Крюков Г.М., Докутович М.И., Жаворонко С.Н. Теоретическая оценка среднего размера куска в зоне регулируемого дробления горных пород взрывом. // Взрывное дело: Сб. научных трудов / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2007. – №ОВ7. – М.: Издательство «МИР ГОРНОЙ КНИГИ», 2007. – С. 196-199.

86. Крюков Г.М., Каширский С.Н., Глазков Ю.В., Жаворонко С.Н. Развитие одномерной волновой теории Сен-Венана на случай камуфлетного взрыва сосредоточенного и бесконечно-длинного зарядов ПВВ // Взрывное дело: Сб. научных трудов / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2007. – №ОВ7. – М.: Издательство «МИР ГОРНОЙ КНИГИ», 2007. – С. 215-233.

87. Крюков Г.М., Стадник В.В., Докутович М.И. Гранулометрический состав горной массы в зоне регулируемого дробления пород взрывом. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №2. – М.: МГГУ, 2007. – С. 34-42.

88. Крюков Г.М., Стадник В.В., Кондрашкин А.В. Разработка методики моделирования и пересчетов на натурные условия результатов лабораторных исследований процесса разрушения пород взрывом. // Сб. Взрывное дело №93/50. – М.: МВК по взрывному делу при АГН, 2001. – С. 121-135.

89. Кузнецов В.А. Аналитическая оценка зон нарушения массива горных пород при взрывных работах. // Сб. «Взрывное дело» №82/39. – М.: Издательство «Недра», 1980. – С. 209-216.

90. Кузнецов В.А. Обоснование технологии буровзрывных работ в карьерах и открытых горно-строительных выработках на основе деформационного зониро-

вания взрывных уступов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МГГУ, 2010. – 43 с.

91. Кузнецов В.А. Обоснование технологии буровзрывных работ в карьерах и открытых горно-строительных выработках на основе деформационного зонирования взрывных уступов // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МГГУ, 2010. – 225 с.

92. Кузнецов В.А. Прогнозирование грансостава взорванной горной массы на основе структурно-деформационного зонирования взрывааемых полигонов. // Сб. Взрывное дело №93/50. – М.: МВК по взрывному делу при АГН, ГУДП «Полиграф», 2001. – С. 47-55.

93. Кузнецов В.А. Проектирование буровзрывных работ. Учебное пособие. – М.: МГГУ, 1997. – 68 с.

94. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. – Новосибирск: Наука, 1977. – 264 с.

95. Кутузов Б.Н. Взрывные работы. – М.: Недра, 1974. – 368 с.

96. Кутузов Б.Н. Взрывные работы. Учебник для техникумов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: «Недра», 1980. – 392 с.

97. Кутузов Б.Н. Определение рациональной степени дробления горных пород взрывом. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: Московский горный институт, 1957. – 162 с.

98. Кутузов Б.Н. Пути вывода горного и взрывного дела России на конкурентоспособный уровень в мировой экономике. // Физические проблемы разрушения горных пород (Записки Горного института. Т. 171.) – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), 2007. – С. 45-54.

99. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МГИ, 1992. – 516 с.

100. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом: Взрывные технологии в промышленности. Ч. II. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МГГУ, 1994. – 448 с.

101. Кутузов Б.Н., Валухин Ю.К., Давыдов С.А. и др. Проектирование взрывных работ. Под общ. редакцией проф., докт. техн. наук Б.Н. Кутузова. – М.: Недра, 1974. – 328 с.
102. Кутузов Б.Н., Галаджий Ф.М., Давыдов С.А. и др. Безопасность взрывных работ в промышленности. – М.: Недра, 1977. – 344 с.
103. Кутузов Б.Н., Ильин А.М., Умнов А.Е. и др. Безопасность взрывных работ в промышленности. – М.: Недра, 1992. – 544 с.
104. Кутузов Б.Н., Казаков Н.Н. Методика расчета дробящего действия взрыва. – Часть I. – Учебное пособие. – М.: МГИ, 1981. – 62 с.
105. Кутузов Б.Н., Комащенко В.Н., Носков В.Ф. и др. Лабораторные и практические работы по разрушению горных пород взрывом. Учеб. пособие для вузов / под общ. редакцией проф. д-ра техн. наук Б.Н. Кутузова. – М.: Недра, 1981. – 255 с.
106. Кутузов Б.Н., Пшеничный М.А. Взрывные работы на открытых разработках. Учебник для школ профтехобразования. Издание 2-е перераб. и доп. – М.: «Недра», 1969. – 160 с.
107. Кутузов Б.Н., Рубцов В.К. Физика взрывного разрушения горных пород. – М.: Изд. МГИ, 1970. – 176 с.
108. Кутузов Б.Н., Рубцов В.К., Валухин Ю.К., Страусман Р.Я. Проектирование взрывов. Учебное пособие. – М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени горный институт, 1973. – 112 с.
109. Кутузов Б.Н., Рубцов В.К., Маршаков В.Н. Физика взрывного разрушения горных пород. Раздел II. Теория взрыва и промышленные взрывчатые вещества. – М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени горный институт, 1972. – 250 с.
110. Кутузов Б.Н., Скоробогатов В.М., Ерофеев И.Е. и др. Справочник взрывника. – М.: Недра, 1988. – 511 с.
111. Кутузов Б.Н., Тарасенко В.П. Физика взрывного разрушения горных пород. Часть II. Учебное пособие. – М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени горный институт, 1975. – 152 с.

112. Малышева Н.А., Анистратов Ю.И. Технология и комплексная механизация открытой добычи угля, руд и нерудных ископаемых. Часть I. Технологические процессы. Выпуск 9. Особенности работы на карьерах в зимних условиях. Под редакцией проф. В.В. Ржевского. – М.: Московский институт радиоэлектроники и горной электромеханики, 1966. – 146 с.

113. Малышева Н.А., Сиренко В.Н. Технология разработки месторождений нерудных строительных материалов. – М.: «Недра», 1977. – 392 с.

114. Мамедов Ш.Н., Нурулиев Т.Н. Разрушение горных пород взрывом. – Баку.: Изд. АН Азерб. ССР, 1968. – 142 с.

115. Мангуш С.К., Крюков Г.М., Фисун А.П. Взрывные работы при подземной разработке полезных ископаемых. Учебник для вузов. – М.: АГН, 2000. – 280 с.

116. Мангуш С.К., Фисун А.П. Справочник по буровзрывным работам на подземных горных разработках. – Ростов-на-Дону: ЗАО «Книга», 2003. – 344 с.

117. Марченко Л.Н. Увеличение эффективности взрыва при добывании полезных ископаемых. – М.: Наука, 1965. – 220 с.

118. Мачинский М.В. Опыт построения теории раздробления горных пород взрывом. – ФТФ, т. III. – Вып. 2-3, 1933.

119. Мачинский М.В. Теория бурения дробью, а также суррогатного и алмазного. // Разрушение горных пород при колонковом бурении. / Труды центрального научного-исследовательского геолого-разведочного института (ЦНИГРИ). – Выпуск 95. – Ленинград - Москва: Главная редакция геолого-разведочной и геодезической литературы (ОНТИ НКТП ССР), 1937. – С. 135-148.

120. Мельников Н.В. Использование энергии взрывчатых веществ и кусковатость пород при взрывных работах. // Горный журнал. – №5-6. – М.: Metallurgizdat, 1940. – С. 61-64.

121. Мельников Н.В., Арсеньев А.И., Газизов М.С. и др. Теория и практика открытых разработок. Под общ. редакцией академика Н.В. Мельников. – М.: «Недра», 1973. – 636 с.

122. Мельников Н.В., Марченко Л.Н. Рациональная конструкция заряда как метод увеличения полезной работы взрыва. // Горный журнал. – №1. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 45-55.

123. Мельников Н.В., Марченко Л.Н. Энергия взрыва и конструкция заряда. – М.: «Наука», 1964. – 134 с.

124. Миндели Э.О. Разрушение горных пород. – М.: Недра, 1974. – 600 с.

125. Миндели Э.О., Кусов Н.Ф., Корнеев А.А., Марцинкевич Г.И. Исследования волн напряжений при взрыве в горных породах. – М.: Наука, 1978. – 112 с.

126. Оверченко М.Н. Рациональные конструкции зарядов эмульсионных ВВ, обеспечивающие эффективное дробление горных пород на высоких уступах карьеров. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. 25.00.20 / Оверченко Михаил Николаевич. – М.: МГГУ, 2004. – 31 с.

127. Оверченко М.Н. Рациональные конструкции зарядов эмульсионных ВВ, обеспечивающие эффективное дробление горных пород на высоких уступах карьеров. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 25.00.20 / Оверченко Михаил Николаевич. – М.: МГГУ, 2003. – 153 с.

128. Олюхин В.В. Переработка нерудных строительных материалов. – М.: Недра, 1988. – 232 с.

129. Парамонов Г.П., Ковалевский В.Н., Дамбаев Ж.Г. Оценка динамического воздействия на массив взрыва шпуровых удлиненных кумулятивных зарядов с демпфирующей прокладкой. // Сб. «Взрывное дело». Выпуск №106/63. Теория и практика взрывного дела. – М.: ЗАО «МВК по ВД при АГН», 2011. – С. 92-99.

130. Патент РФ №2111359 от 20.05.1998 г. // «Устройство для скважинной гидродобычи полезных ископаемых».

131. Патент РФ №2169939 от 27.06.2001 г.

132. Патент РФ №2186208 от 27.07.2002 г. // «Способ скважинной добычи минеральных солей».

133. Патент RU 2239783 С2 от 09.12.2002 г. // «Способ получения заданной степени дробления трещиноватого горного массива при групповом взрывании скважинных зарядов ВВ».

134. Патент RU 2239784 С1 от 02.06.2003 г. // «Способ получения заданной степени дробления трещиноватого массива взрывом».

135. План Развития горных работ на 2010 год по Мончаловскому месторождению известняков и керамзитовых глин. – г. Ржев, 2009. – 45 с.

136. Покровский Г.И. Взрыв. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 190 с.

137. Покровский Г.И. Предпосылки теории дробления пород взрывом. // В кн.: Вопросы теории разрушения горных пород действием взрыва. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 140-149.

138. Покровский Г.И., Черниговский А.А. Расчет зарядов при массовых взрывах на выброс. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 86 с.

139. Прогнозные оценки размеров зон разной степени разрушения полигалитовых пород при взрывах удлиненных зарядов ПВВ на больших глубинах. – М.: МГГУ, 2008. – 9 с.

140. Протоdjяконов М.М., Чирков С.Е. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. – М.: Наука, 1964.

141. Почекутов В.И. Установление закономерностей взрывания обводненных пород водонаполненными взрывчатыми веществами для оптимизации параметров БВР на карьерах. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГГУ, 2000. – 24 с.

142. Правила безопасности при перевозке ВМ автомобильным транспортом. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 08.11.1994 г. N57. – М.: НПО ОБТ, 1995.

143. Разработка специального проекта ВР по взрывной активации полигалитовых пород в вертикальной камере. Отчет по договору №441/1-1. – М.: АНО «НОИВ», 2006. – 30 с.

144. Репин Н.Я. Исследования процессов взрывной подготовки и экскавации вскрышных пород угольных разрезов. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Кемерово: Кузбасский политехнический институт, 1971. – 291 с.

145. Репин Н.Я., Богатырев В.П., Буткин В.Д. и др. Буровзрывные работы на угольных разрезах. Под общей редакцией проф., д-ра техн. наук Н.Я. Репина. – М.: Недра, 1987. – 254 с.

146. Репин Н.Я., Потапов А.И., Курочкин А.Н., Редькин М.Б., Ряполов А.Н. Влияние качества взрывной подготовки железистых кварцитов на показатели работы дробильно-размольного оборудования. // В кн.: Повышение эффективности и качества использования недр КМА. – Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1976. – С. 40-45.

147. Репин Н.Я., Потапов М.И., Лоханов Б.Н. Повышение эффективности буровзрывных работ на угольных карьерах Кузбасса. – М.: Центральный научно-исследовательский институт экономики и научно-технической информации угольной промышленности (ЦНИЭИуголь), 1967. – 97 с.

148. Репин Н.Я., Потапов А.И., Редькин М.Б., Толкушев А.Г., Томаков В.И. Экспериментальное исследование влияния взрыва на прочность железистых кварцитов с учетом их анизотропии. // В кн.: Технология и техника разработки железорудных месторождений КМА. – Воронеж: Издательство ВГУ, 1982. – С. 27-31.

149. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть I. Производственные процессы. – М.: Недра, 1985. – 509 с.

150. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. Изд. 2-е, дополненное и переработанное. – М.: «Недра», 1974. – 520 с.

151. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. – М.: Издательство «Недра», 1968. – 639 с.

152. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Учебник, изд. 3, перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 631 с.

153. Ржевский В.В., Малышева Н.А. Технология и комплексная механизация открытой добычи угля, руд и нерудных ископаемых. Часть I. Технологиче-

ские процессы. Выпуск 4. Выемка и погрузка горной массы. – М.: Московский институт радиоэлектроники и горной электромеханики, 1964. – 250 с.

154. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

155. Родионов В.Н. К вопросу о повышении эффективности взрыва в твердой среде. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1962. – 36 с.

156. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. Под ред. М.А. Садовского. – М.: Недра, 1971. – 224 с.

157. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Исследование процесса развития взрывной полости при камуфлетном взрыве. // В сб.: Взрывное дело, №64/21. – М.: Недра, 1968.

158. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. – М.: Недра, 1986. – 301 с.

159. Ромашов А.Н. Особенности действия крупных подземных взрывов. – М.: Недра, 1980. – 243 с.

160. Российский статистический ежегодник. 2007. Ред. кол.: Соколин В.Л. - председатель ред. кол., Баранов Э.Ф., Гельвановский М.И., Гохберг Л.М., Житков В.Б. и др. Стат. сб. / Росстат. – М., 2007. – 826 с.

161. Рубцов В.К. Исследование дробимости горных пород взрывами на карьерах. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МГИ, 1971. – 412 с.

162. Ряполов А.Н. Управление магнитными свойствами железных руд путем изменения их микроструктуры при взрывном воздействии. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 01.04.07 / Ряполов Алексей Николаевич. – М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени горный институт, 1982. – 147 с.

163. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. – М. - Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 29 с.

164. Садовский М.А. Сейсмический эффект взрывов. Труды всесоюзного совещания по буровзрывным работам. – М. - Л.: Гостоптехиздат, 1940. – С. 290-319.

165. Садовский М.А, Костюченко В.Н. О сейсмическом действии подземных взрывов. Доклады АН СССР, том 214, №5. – М.: 1974. – С. 1097-1100.

166. Сенченко Д.С., Докутович М.И. Геоэкологические аспекты взрывных работ на месторождениях известняка // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №8. – М.: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2014. – С. 215-220.

167. Сивенков В.И., Докутович М.И. Особенности этапов разработки и промышленного применения взрывчатых материалов (ВМ). // РИО+10: Экологическая безопасность как ключевой фактор устойчивого развития. Сб. докладов / Шестая международная экологическая конференция студентов и молодых ученых. Москва, МГГУ, 2002 г. – Том 1. – Смоленск: Издательство «Ойкумена», 2002. – С. 147-149.

168. Справочник геофизика / Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Под ред. д-ра геол.-минералог. наук Н.Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 455 с.

169. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. Под ред. Мельникова Н.В., Ржевского В.В., Протодьяконова М.М. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

170. Справочник по буровзрывным работам. Под общей ред. проф., д.т.н. Друкованого М.Ф. – М.: Недра, 1976. – 631 с.

171. Суханов А.Ф. Разрушающая способность взрывчатых веществ. – Уголь, 1956, №8. – С. 34-38.

172. Суханов А.Ф. Разрушение горных пород взрывом. // В сб.: Вопросы теории разрушения горных пород действием взрыва. – М.: Изд. АН СССР, 1958. – С. 61-77.

173. Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве. 3-ье изд. – М.: 1997. – 233 с.

174. Технический проект производства взрывных опытно-методических работ по активации полигалитовых пород в горизонтальной камере (проект). – М.: МГГУ, 2006. – 17 с.

175. Типовой проект ведения буровзрывных работ на карьерах ОАО «Карельский окатыш». – г. Костомукша: ОАО «Карельский окатыш», 2003. – 24 с.

176. Типовой проект производства буровзрывных работ на карьере «Жуково» ООО «Карбонат». – г. Москва, 2003. – 31 с.

177. Томаков П.И., Наумов И.К. Технология, механизация и организация открытых горных работ. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 312 с.

178. Трубецкой К.Н. Методика и результаты исследования влияния качества дробления горной массы на производительность погрузчиков. // Повышение эффективности открытых разработок (прогнозирование развития, совершенствование техники, технологии). – М.: Издательство «Наука», 1976. – С. 50-61.

179. Трубецкой К.Н., Мильгунов В.Г. Влияние кусковатости взорванной горной массы на технико-экономические показатели работы погрузчиков. // Горный журнал. – №11. – М.: Издательство «Недра», 1975, – С. 22-24.

180. Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Веницкий К.Е., Мельников Н.Н. и др. Справочник. Открытые горные работы. – М.: Горное бюро, 1995. – 590 с.

181. Увалиев М.К. Управление параметров волн напряжений при взрывном разрушении трещиноватых массивов. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Республика Казахстана. Алматы: Казахский национальный технический университет имени К. Сатпаева, 1999. – 25 с.

182. Фаддеенков Н.Н. К расчету грансостава при взрывном дроблении блочного массива. // Сб. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, №5. – Новосибирск: ИГД СО Акад. наук СССР, 1976. – С. 59-63.

183. Фаддеенков Н.Н. О практическом применении при взрывной отбойке закона Розина-Раммлера. // Сб. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, №1. – Новосибирск: ИГД СО Акад. наук СССР, 1975. – С. 94-97.

184. Фаддеенков Н.Н. О практическом учете влияния блочной структуры горной породы на результат взрывного дробления. // Сб. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, №5. – Новосибирск: ИГД СО Акад. наук СССР, 1977. – С. 64-68.

185. Фаддеенков Н.Н. Об аналитическом описании грансостава взорванной массы горной породы с учетом предварительной трещиноватости. // Сб. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, №2. – Новосибирск: ИГД СО Акад. наук СССР, 1975. – С. 61-63.

186. Фаддеенков Н.Н., Труфакин И.Е., Шемякин Е.И. О математическом описании дезинтеграции пород иерархичной дефектной структуры. // Сб. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, №6. – Новосибирск: ИГД СО Акад. наук СССР, 1980. – С. 3-7.

187. Физика взрыва (том 1). Под ред. Орленко Л.П. – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.

188. Физика взрыва (том 2). Под ред. Орленко Л.П. – М.: Физматлит, 2004. – 656 с.

189. Физика взрыва. Под ред. Станюковича К.П. – М.: Изд. «Наука» Глав. ред. Физ-мат литературы, 1975. – 704 с.

190. Фурсов А.А. Обоснование оптимальных параметров термического расширения взрывных скважин на карьерах железистых кварцитов. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГГУ, 2003. – 22 с.

191. Хохлов С.В. Методика прогнозирования гранулометрического состава при буровзрывной отбойке гранита на щебень. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.15.11 / Хохлов Сергей Владимирович. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова, 2000. – 125 с.

192. Чирков А.С. Добыча и переработки строительных горных пород. Учебник для вузов. Изд. 2-е. – М.: МГГУ, 2005. – 623 с.

193. Чурилов Н.Г. Разработка ресурсосберегающего способа взрывной отбойки железистых кварцитов. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГГУ, 1997. – 22 с.
194. Шевяков Л.Д. Разработка месторождений полезных ископаемых. – Москва-Ленинград: УГЛЕТЕХИЗДАТ, 1951. – 694 с.
195. Эстеров Я.Х., Бродов Е.Ю., Иванов М.И. Буровзрывные работы при транспортном строительстве. Учебник. – М.: «Транспорт», 1983. – 328 с.
196. Юматов Б.П. Определение экономической эффективности капиталовложений и глубины карьера при комбинированной разработке месторождений. // Горный журнал. – №2. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 13-19.
197. Юматов Б.П. Основные вопросы комбинированной разработки рудных месторождений. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: Московский институт стали, 1961. – 315 с.
198. Юматов Б.П. Технология открытых горных работ и основные расчеты при комбинированной разработке рудных месторождений. – М.: Издательство «Недра», 1966. – 147 с.
199. Юматов Б.П., Байков Б.Н. Технология буровзрывных работ на карьерах цветной металлургии. – М.: Изд-во «Недра», 1969. – 103 с.
200. Юматов Б.П., Кулагин В.С. Оптимизация решений горно-геологических задач с использованием показателя сложности оруденения. // Горный журнал. – №11. – М.: Издательство «Недра», «Горный журнал», 1984. – С. 22-24.
201. Юматов Б.П., Ройзман М.И. Зависимость производительности экскаваторов и локомотивосоставов от выхода крупнокусковатых фракций. // Горный журнал. – №5. – М.: Издательство «Недра», 1966. – С. 24-28.
202. Юматов Б.П., Секисов Г.В., Буянов М.И. Нормирование и планирование полноты и качества выемки руды на карьерах. – М.: Недра, 1987. – 183 с.
203. Юхансен К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. – М.: Изд. «МИР», 1973. – 352 с.

204. Krjukov G.M., Stadnik V.V., Dokutovich M.I. Theoretical estimates of the determined regularities of extent of crushing of rocks as a result of explosion of larch charge of industrial explosive (Laboratory and industrial researches). // 7th world conference on explosives & blasting EFEE 2013. – M.: EFEE, Alliance Press Ltd., 2013 – Part II., pp. 118-121.
205. Selberg H.L. Transient Compression Wave from Spherical and Cylindrical Cavities. // Arkiv f. Fisik, №5, 1952 – pp. 97-108.
206. Sharp J.A. The program of Elastic Waves by Explosive Pressure. // Geophysics, №7, 1942 – pp. 144-154, 311-321.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

П Р И Л О Ж Е Н И Е 1

Федеральное агентство по образованию
Московский государственный горный университет
Кафедра РГПВ

Крюков Г.М., Докутович М.И.

**Руководство по выполнению практических занятий
по дисциплине:
«Математические методы моделирования и расчеты на ЭВМ»**

Москва, 2008 г.

Федеральное агентство по образованию
Московский государственный горный университет
Кафедра РГПВ

Крюков Г.М., Докутович М.И.

**Руководство по выполнению лабораторных и практических занятий
по дисциплине: «Физика разрушения горных пород
при бурении и взрывании»**

Москва, 2008 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3**СОГЛАСОВАНО:**

Начальник
межрегионального отдела
по горному надзору
МТУ Ростехнадзора по ЦФО



В.С. Нурмухамедов

_____ 2007 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель
генерального директора
ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ»



А.Г. Потапов

_____ 2007 г.

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА

**Оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном
дроблении негабаритов известняков на карьере «Жуково»
ООО «Карбонат»**

РАЗРАБОТАНО:

Инженер отдела по проектированию
взрывных работ и экспертной работе
ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ»

М.И. Докутович
«1» _____ 08 2007 г.

2007 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор
по научно-исследовательской и
инновационной деятельности МГГУ

 С.М. Романов
«27» февраля 2008 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Директор
ООО «Карбонат»

 А.М. Пучков
2008 г.



Заместитель

генерального директора

ООО ИТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ»

 А.Г. Потапов
2008 г.



РЕКОМЕНДАЦИИ

по рациональным параметрам безнегабаритного взрывного дробления
известняков на Мончаловском месторождении известняков
на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»

РАЗРАБОТАНО:

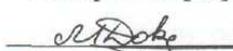
Заведующий кафедрой РГПВ МГГУ

 В.А. Белин
«27» февраля 2008 г.

Доктор технических наук,
Профессор кафедры РГПВ МГГУ

 Г.М. Крюков
«27» февраля 2008 г.

Аспирант кафедры РГПВ МГГУ

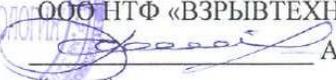
 М.И. Докутович
«27» февраля 2008 г.

2008 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5



УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель генерального директора
ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ»

 А.Г. Потапов
 2007 г.

А К Т

о проведении опытно-промышленного взрывного дробления негабаритов известняков
на карьере «Жуково» ООО «Карбонат» от 22.11.2007 г.

Таблица 1

Показатели взрывных работ по взрывному дроблению негабаритов известняков
на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»

Показатели	№ негабарита					
	7	8	9	10	11	12
Объем негабарита, м ³ (a×b×c)	0,74×0,63×0,59	0,60×0,60×0,60	0,70×0,57×0,68	1,00×0,67×0,66	0,80×0,63×0,73	0,78×0,55×0,60
Количество шпуров, шт	1	1	1	1	1	1
Диаметр шпуров, мм	40	40	40	40	40	40
Длины шпуров, м	0,31	0,52	0,30	0,44	0,455	0,37
Длины зарядов, м	0,055	0,053	0,055	0,057	0,110	0,070
Массы зарядов, кг	0,054	0,048	0,054	0,056	0,100	0,067
Расстояние между шпурами, м	-	-	-	-	-	-
Удельный расход ВВ, кг/м ³	0,2	0,22	0,2	0,13	0,27	0,26
Взрывчатое вещество	Аммонал (аммонит № 6ЖВ)					
Способ инициирования зарядов	Электрический, с использованием ЭДЗИ (ЭДБИ)					
Крепость пород (по СНиП)	VII-ая группа					
Плотность породы, кг/м ³	2,57	2,18	2,105	2,592	2,598	2,142

Таблица 2

**Результаты взрывного дробления негабаритов известняков
на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»**

к, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d , мм	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$	$50 < d \leq 500$
l_k^{max} , мм	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	500
d_k^{sp} , мм	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45	275
7														
$m_{пор}$, Г	15	157	536	623	150	543	615	940	1492	2056	960	2099	3185	470898
8														
$m_{пор}$, Г	36	150	263	343	88	295	302	431	712	866	328	1068	1720	392062
9														
$m_{пор}$, Г	81	324	1079	2558	346	1205	1211	1777	2920	3691	1761	2844	5110	341584
10														
$m_{пор}$, Г	99	289	778	866	295	1234	1348	2094	3356	4076	2086	4843	7146	528597
11														
$m_{пор}$, Г	304	1077	2532	3528	971	4024	5250	7141	11444	13130	7699	11309	18658	483754
12														
$m_{пор}$, Г	368	886	2771	2570	511	1554	1640	2182	3540	4406	1951	3711	5449	302620

Главный инженер ООО «Карбонат»

Инженер

Взрывник



С.В. Артюхова

М.И. Докутович

Н.Н. Поярков

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

СОГЛАСОВАНО:

Управление по технологическому и
экологическому надзору Федеральной
службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору по
Республике Карелия

Зам. Руководителя Управления А. В. [подпись]
«05» 06 _____ 2007 г.



Технический директор
ОАО «Карельский окатыш»
И.А. Магаршак
«05» _____ 2007 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор
по научно-исследовательской и
инновационной деятельности МГГУ

С.М. Романов

_____ 2007 г.



ПРОГРАММА И МЕТОДИКА

Оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном
дроблении негабаритов железистых кварцитов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник СЦВР
ОАО «Карельский окатыш»

[подпись] Е.М. Сапронов
«16» _____ 2007 г.

РАЗРАБОТАНО:

Заведующий кафедрой РГПВ МГГУ

[подпись] В.А. Белин
«15» _____ 2007 г.

Доктор технических наук,
Профессор кафедры РГПВ МГГУ

[подпись] Г.М. Крюков
«15» _____ 2007 г.

Аспирант кафедры РГПВ МГГУ

[подпись] М.И. Докутович
«15» _____ 2007 г.

2007 г.

[подпись]

ПРИЛОЖЕНИЕ 7



УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор
ОАО «Карельский окатыш»

И.А. Магаршак
«20» апр 2008 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор

по научно-исследовательской и
инновационной деятельности МГГУ



С.М. Романов

«15» апр 2008 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по рациональным параметрам
взрывного дробления железистых кварцитов
на Костомукшском месторождении железистых кварцитов
на карьерах ОАО «Карельский окатыш»

СОГЛАСОВАНО:

Заместитель начальника БВИ по ВР
ОАО «Карельский окатыш»

Е. Сапронов
«15» апр 2008 г.

РАЗРАБОТАНО:

Заведующий кафедрой РГПВ МГГУ
доктор технических наук, профессор

В.А. Белин
«15» апр 2008 г.

Доктор технических наук,
Профессор кафедры РГПВ МГГУ

Г.М. Крюков
«12» апр 2008 г.

Аспирант кафедры РГПВ МГГУ

М.И. Докутович
«12» апр 2008 г.

2008 г.

Заключение

О результатах использования «ПРОГРАММЫ И МЕТОДИКИ оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном дроблении негабаритов железистых кварцитов» и «РЕКОМЕНДАЦИЙ по рациональным параметрам взрывного дробления железистых кварцитов на Костомукшском месторождении железистых кварцитов на карьерах ОАО «Карельский окатыш»

1. В мае 2007 г. ОАО «Карельский окатыш» получил «ПРОГРАММУ И МЕТОДИКУ оценки гранулометрического состава горной массы при взрывном дроблении негабаритов железистых кварцитов», а в апреле 2008 г. – «РЕКОМЕНДАЦИИ по рациональным параметрам взрывного дробления железистых кварцитов на Костомукшском месторождении железистых кварцитов на карьерах ОАО «Карельский окатыш», которые были разработаны на кафедре РГПВ МГТУ. Эти документы были проанализированы в техническом отделе ОАО «Карельский окатыш» и приняты для совершенствования параметров БВР на карьерах ОАО «Карельский окатыш».

2. Со второго квартала 2008 г. параметры БВР уточненные в соответствии с указанными выше «РЕКОМЕНДАЦИЯМИ...» стали применяться на _____ уступах (_____ горизонтах) при взрывном дроблении железистых кварцитах.

3. В этом случаи действительно зафиксировано снижение выхода негабарита до 1-2% с уменьшением среднего размера куска во взорванной горной массе на 5÷10%.

Технический директор
ОАО «Карельский окатыш»



И.А. Магаршак

Заместитель начальника БВЦ по ВР
ОАО «Карельский окатыш»

Е.М. Сапронов

ПРИЛОЖЕНИЕ 9



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «Карбонат»

А.М. Пучков
 А.М. Пучков
 2008 г.

А К Т

о проведении опытно-промышленного взрыва по взрывному дроблению известняков на Мончаловском месторождении известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат» от 13.03.2008 г.

Условия проведения опытно-промышленного взрыва:

1. Разрушаемая порода – известняк;
2. Крепость пород по СНиП – VII-ая группа;
3. Плотность породы $\rho_{пор} = 2,36 \cdot 10^3$ кг/м³;
4. Взрывчатое вещество – Гранулит РП;
5. Количество скважин – 9 шт;
6. Обводненность скважин – сухие;
7. Способ инициирования зарядов — электрический, с использованием ЭДЗИ (ЭДБИ) с применением промежуточных детонаторов, опущенных в скважину;
8. Промежуточные детонаторы – Гранулит РП (измельченный, 3 кг) и аммонал-200 (аммонит № 6ЖВ);
9. Схема инициирования – порядная;
10. Буровое оборудование – буровые станки (пневмоударного бурения) СБУ-100.

Таблица 1

Параметры взрывных работ

	Показатели	Едн. изм.	Значения
1.	диаметр скважин	мм	110
2.	вместимость ВВ в 1 п.м. скважины	кг/м	7,1
3.	высота уступа	м	12
4.	сетка скважин	м	2,4×2,4
5.	длина перебура	м	0,7
6.	длина забойки	м	2
7.	длина заряда	м	10,7
8.	длина скважины	м	12,7
9.	масса заряда в одной скважине	кг	80 (76)
10.	удельный расход ВВ	кг/м ³	1,2
11.	плотность заряжения	кг/м ³	0,75
12.	выход негабарита	%	<1



Рис. 1 Опытно-промышленное взрывное дробление известняка

АКТ о проведении опытно-промышленного взрыва по взрывному дроблению известняков на Мончаловском месторождении известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат» от 13.03.2008 г.

Выводы:

1. При взрывании скважных зарядов гранулита РП с предлагаемыми параметрами размещения зарядов на блоке уступа _____ карьера «Жуково» осуществлено качественное дробление известняка при среднем размере кусков в развале $d_{cp} = 0,17$ м.

2. При проведении опытно-промышленного взрыва на карьере «Жуково» выход негабарита составил меньше 1%.

Директор Ржевского филиала
ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ»



Н.А. Васюхнова

Главный инженер ООО «Карбонат»

С.В. Артюхова

Инженер

М.И. Докутович

Взрывник

А.А. Лебедев

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

УТВЕРЖДАЮ:

Директор
ФГУП «ЦНИИгеолнеруд»

Е.М. Аксенов

«__» _____ 2008 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор
по научно-исследовательской и
инновационной деятельности МГГУ

С.М. Романов

«__» _____ 2008 г.



ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ

размеров зон разной степени разрушения полигалитовых пород
при взрывах удлиненных зарядов ПВВ на больших глубинах

СОГЛАСОВАНО:

Ведущий научный сотрудник
кандидат геолого-минералогических наук

А.К. Вишняков

«__» _____ 2008 г.

РАЗРАБОТАНО:

Заведующий кафедрой РГПВ МГГУ
доктор технических наук, профессор

В.А. Белин

«__» _____ 2008 г.

Доктор технических наук,
Профессор кафедры РГПВ МГГУ

Г.М. Крюков

«29» _____ 2008 г.

Аспирант кафедры РГПВ МГГУ

М.И. Докутович

«29» _____ 2008 г.

2008 г.

Россия Федерациясе табиғатъ
байлыклары министрлыгы
Жир асты байлыкларын
файдалану федераль агентлыгы
Федераль дәүләт унитар
предприятиесе «Руда булмаган
файдалы казылмалар геологиясе
үзәк фәнни-тикшерену институты»



ЦНИИГЕОЛНЕРУД

Министерство природных ресурсов
Российской Федерации
Федеральное агентство
по недропользованию

Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный научно-
исследовательский институт геологии
нерудных полезных ископаемых»

ФГУП «ЦНИИГЕОЛНЕРУД»

420097, Казань, Зинина, 4

<http://www.geolnerud.com>

тел.: (843) 2364793 факс: (843) 2364704

e-mail: root@geolnerud.com

№ _____
На № _____ от _____



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

ФГУП «ЦНИИГеолнеруд»

Е.М.Аксенов

« _____ » 2008 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы М.И.Докутовича

Комиссия в составе руководителя АТСИЦ доктора геолого-минералогических наук, профессора Т.З.Лыгиной, зав.отделом технологических исследований доктора технических наук А.В.Корнилова и зав.лабораторией геотехнологии кандидата геолого-минералогических наук А.К.Вишнякова рассмотрев диссертационную работу М.И.Докутовича на тему «Обоснование детерминированных закономерностей разрушения горных пород взрывом заряда ПВВ и рациональных параметров сетки скважин на карьерах», пришла к следующему заключению.

В диссертации М.И.Докутовича впервые была разработана модель процесса трещинообразования и степени дробления горных пород на разных расстояниях от оси заряда. Результаты этих расчетов были представлены ФГУП «ЦНИИГеолнеруд» в виде рекомендации «Прогнозные оценки размеров зон разной степени разрушения полигалитовых пород при взрывах удлиненных зарядов ПВВ на больших глубинах» и годового информационного отчета за 2006 г. по договору № 441/1 «Разработка параметров зарядов ПВВ, взрывом которых обеспечивается активация полигалитовых пород в вертикальной скважине и в горизонтальной части вертикально-горизонтальной скважины, специального проекта взрывных работ и его методического обеспечения в процессе ОМР».

Эти материалы позволили ФГУП «ЦНИИГеолнеруд» при подготовке окончательного отчета по договору № 441 «Выполнение аналитических, технологических, технических лабораторных исследований, с проведением расчетных, проектно-конструкторских работ и методического обеспечения ОМР по гидродобыче полигалитовых пород Шарлыкской площади в вертикально-горизонтальной скважине с получением и изучением вещественного состава технологической пробы и разработкой ТЭД временных кондиций» впервые точно рассчитать размеры зон задан-

ной степени дробления полигалитовых пород от взрыва удлиненных зарядов тротила в горизонтальной части вертикально-горизонтальной скважины для разработанной в институте модификации скважинного способа гидродобычи. Полученные параметры зон дробления позволяют прогнозировать объем извлекаемых полигалитовых пород, рассчитать рентабельность данного способа и наметить величину минимальной промышленной мощности пласта при обосновании условий на запасы данных пород.

Председатель комиссии,
руководитель АТСИЦ,
д.г.-м.н., профессор



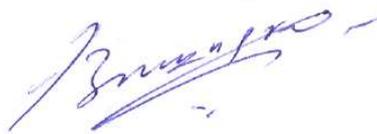
Т.З.Лыгина

Члены комиссии:
Зав.отдела технологических исследований,
д.т.н.



А.В.Корнилов

Зав.лаборатории геотехнологии,
к.г.-м.н.



А.К.Вишняков