

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»

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук.

Научные руководители:

Крюков Георгий Михайлович

доктор технических наук, профессор;

Айнбиндер Игорь Израилевич

доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор;

кандидат технических наук, доцент.

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 г. в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.002.074.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс: 8 (495) 360-89-60.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте www.ипконран.рф.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Федотенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При разработке месторождений открытым способом эффективность производства в значительной мере определяется эффективностью проведения буровзрывных работ. Основной задачей буровзрывных работ на карьерах является обеспечение заданной степени дробления горных пород. В настоящее время существуют ряд методик расчетов параметров буровзрывных работ. Предполагается, что параметры буровзрывных работ, 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 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. В тоже время обоснование рациональных параметров зарядов промышленных взрывчатых веществ, 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, которая в значительной степени определяет степень дробления карбонатных пород.

Цель работы заключается в обосновании 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 промышленных взрывчатых веществ;
- 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 буровзрывных работ обеспечивающая заданную степень взрывного дробления карбонатных пород.

Новизна работы заключается в установлении закономерностей формирования взрывного дробления горных пород на разных расстояниях от оси взорванного заряда промышленных взрывчатых веществ.

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: общей 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 промышленного взрывчатого вещества 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;

– положительными результатами внедрения рекомендаций по рациональным параметрам буровзрывных работ при ведении взрывных работ на карьерах Костомукшского и Мончаловского месторождений;

– положительными результатами внедрения методики расчета степени дробления полигалитовых пород при подземных взрывах удлиненных зарядов промышленных взрывчатых веществ на больших глубинах.

Научное значение работы заключается в установлении закономерностей формирования степени дробления горных пород с удалением от взорванного заряда промышленного взрывчатого вещества.

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

Личный вклад автора состоит в реализации идеи работы путем постановки цели и определении задач исследований, сборе и анализе литературных источников по вопросу изученности существующих теорий и моделей процессов деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ, анализе существующих взрывных технологий при открытой разработке полезных ископаемых на карьерах, разработке программ и методик экспериментальных исследований, организации и проведении лабораторных и опытно-промышленных исследований, обработке и анализе полученных результатов исследований, обосновании научных положений и выводов, подготовке публикаций.

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 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»» 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, СПбГИ, 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. Трубецкого «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 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель, идея, задачи и методы исследований, изложены научная новизна, защищаемые научные положения и практическое значение работы, представлены сведения об апробации работы.

В первой главе диссертации выполнен анализ существующих взрывных технологий при открытой разработке полезных ископаемых на карьерах, приведены физико-технические свойства разрушаемых горных пород.

Вторая глава посвящена вопросу изученности теорий и моделей процессов деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ. Обоснован выбор теоретической модели, описывающей процессы разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ.

Третья глава содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований по установлению закономерностей взрывного дробления карбонатных пород при использовании промышленных взрывчатых веществ, приведены экспериментальные лабораторные и натурные исследования. Показана удовлетворительная сходимость установленных закономерностей взрывного дробления пород с результатами экспериментальных исследований.

В четвертой главе разработана и приведена методика расчета рациональных параметров буровзрывных работ обеспечивающих заданную степень взрывного дробления горных пород.

В заключении приведены основные выводы, полученные по результатам выполненных исследований. **В приложениях** представлены акты и заключения о поведении опытно-промышленных исследований и внедрения результатов диссертационной работы.

Одним из главных параметров при оценке результатов взрывного дробления горных пород в горном деле и строительстве является оценка

среднего размера куски в развале. Знание зависимости этой величины от параметров буровзрывных работ и свойств горных пород позволяет надёжно рассчитывать не только технико-экономические показатели буровзрывных работ на предприятиях, но и решать ряд других важных задач горного производства – проектирование и выбор горного оборудования на карьерах и обогатительных фабриках, технико-экономические показатели горных работ и обогатительного оборудования и т.д. В существующих методиках оценки гранулометрического состава, среднего размера куски породы, выхода негабарита и т.д. недостаточно учитывается физическая сущность разных процессов разрушения пород на разных расстояниях от взрывающегося заряда промышленного взрывчатого вещества. Зависимость d_{cp} от параметров буровзрывных работ и свойств пород определяются по эмпирическим закономерностям на основе опыта, а на действующем предприятии его рациональные значения – путём проведения промышленных взрывов.

В ИГД им. А.А. Скочинского, ИФЗ, МГГУ, ВНИМИ и др. организациях в 60 – 70 гг. XX века был проведен большой цикл исследований по оценке влияния скорости деформации горных пород 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. Исследования по данному направлению 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., Демидкоком Г.П., Дроговейко И.З., Дубновым Л.В., Дамбасевым 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., Казаковым Н.Н., Кутузовым Б.Н., Крюковым Г.М. и многими др.

В диссертации на основе развития «Феноменологической квазистатическо-волновой теории В.Н. Родионова о крупномасштабном подземном взрыве» дается теоретические оценки детерминированных закономерностей дробления горных пород в зоне регулируемого дробления и среднего размера куски в развале с учетом физико-технических свойств горных пород, термодинамических параметров зарядов промышленных взрывчатых веществ и параметров их размещения на взрываемом блоке и устанавливается величина степени дробления пород на разных расстояниях от оси взорванного заряда с использованием закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в породе при взрывах в ней зарядов промышленных взрывчатых веществ и развития теории трещин на рассматриваемый процесс с учетом распределения микронарушенности в породе, что подтверждается положительными результатами лабораторных и опытно-промышленных экспериментальных исследований взрывного дробления пород.

Элементы теории разрушения горных пород взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ

Любой процесс разрушения – это процесс развития трещин. Средний размер кусков породы, формирующихся в некоторой области на заданном расстоянии от взорванного заряда, обратно пропорционален числу трещин в этой области. Поэтому:

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

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

Развитие каждой трещины происходит от некоторого дефекта, поэтому принимается:

$$N_{\text{мп}} = N_{\text{оф}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{оф}}$ - число дефектов (микротрещин) в породе заданного уровня.

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

$$N_{\text{оф}} \sim l_{\text{оф}}^{-\alpha}, \quad \Rightarrow \quad l_{\text{кск}} \sim l_{\text{оф}}^{\alpha}, \quad (3)$$

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

Из теории трещин известно, что:

$$\sigma_{\text{кр}} = k_c \cdot (l_{\text{оф}})^{0.5}, \quad \text{Па}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{кр}}$ - 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:

$$l_{\text{кск}} \sim \sigma^{-2\alpha}. \quad (5)$$

Установлено, что квазистатические напряжения, определяющие процессы разрушения горных пород в зоне регулируемого дробления, убывают с удалением от удлиненного заряда по законам:

$$\sigma_{\text{аа}} = P_{\text{ж}} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2; \quad \sigma_{\text{rr}} = -P_{\text{ж}} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2; \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{аа}}$ - растягивающее напряжение, Па; σ_{rr} - сжимающее напряжение, Па.

Объединяя (5) и (6), устанавливается закон изменения размеров кусков породы в зоне регулируемого дробления:

$$l_{\text{кск}} = l_{\text{он}} \cdot \left(\frac{r}{r_{\text{он}}} \right)^{4\alpha}, \quad (7)$$

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

Интегрируя (7) по области регулируемого дробления, устанавливается средний размер кусков породы в области $r \leq r_{\text{оп}}$ в виде:

$$d_{\text{сп}} = \frac{l_{\text{он}}}{2\alpha + 1} \cdot \left(\frac{r_{\text{оп}}}{r_{\text{он}}} \right)^{4\alpha}; \quad d_{\text{сп}} = l_{\text{кск}}^{\text{max}} / (2\alpha + 1), \quad (8)$$

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

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

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt{P_{жс} / \sigma_{мд}}, \text{ М,} \quad (9)$$

где $\sigma_{мд}$ - предел прочности породы, соответствующий её интенсивному мелкодисперсному дроблению. Для пород, разрушенных в лабораторных условиях, $\sigma_{мд}$ равно:

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

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

$$b_\tau = a_0 \cdot \sqrt{P_{жс} / 2\tau_{сдв}}, \text{ М,} \quad (11)$$

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

Аналогичные соотношения при взрыве сосредоточенного заряда имеют вид:

$$\sigma_{rr} = -P_{жс} \left(\frac{a_0}{r} \right)^3; \quad \sigma_{\alpha\alpha} = \sigma_{\beta\beta} = -0,5\sigma_{rr}; \quad (12)$$

$$l_{кск} = l_{он} \cdot \left(\frac{r}{r_{он}} \right)^{6\alpha}; \quad (13)$$

$$d_{ср} = \frac{l_{он}}{2\alpha + 1} \cdot \left(\frac{r_{оп}}{r_{он}} \right)^{6\alpha}; \quad d_{ср} = l_{кск}^{max} / (2\alpha + 1); \quad (14)$$

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / \sigma_{мд}}; \quad b_0 = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / \sigma_{рас}}; \quad b_\tau = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / 2\tau_{сдв}}. \quad (15)$$

Соотношениями (7) – (9) и (11) – (15), опираясь на Феноменологическую квазистатическо-волновую модель воздействия взрыва зарядов промышленных взрывчатых веществ на породу, установлены теоретические закономерности формирования кусков породы на разных расстояниях от зарядной полости, т.е. степень её разрушения, в зоне регулируемого дробления. Для установления реального распределения кусков в развале достаточно определить значения параметров α , $l_{он}$ и $r_{он}$ в разных зонах разрушения.

Соотношения (9), (10) и (15) позволило сформулировать теоретическое обоснование первого научного положения: **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.**

При оценке эффективности взрывного дробления горных пород основными критериями, определяющими эффективность ведения взрывных и последующих горных работ, являются: *выход негабарита, степень дробления горных пород*, форма развала, количество «порогов» и т.д., причем первые два принято считать главными. Поэтому была поставлена и решена задача по установлению обобщающей зависимости отдельно для каждого из указанных выше критериев взрывного дробления горных пород.

Установлено, что b_0 - радиус зоны регулируемого дробления горных пород при взрыве удлиненного заряда промышленного взрывчатого вещества равен:

$$b_0 = a_0 \cdot \sqrt{P_{ж} / \kappa_3 \sigma_{рас}}, \quad (16)$$

где a_0 - радиус зарядной полости, м; $P_{ж}$ - давление продуктов детонации (ПД) в точке Жуге, Па; $\sigma_{рас}$ - предел прочности пород на одноосное растяжение,

Па. $\kappa_3 = 1 + \frac{2\gamma P_{ж}}{E}(1 + \mu)$; γ - показатель изоэнтропы ПД; E - модуль упругости (Юнга) породы, Па; μ - коэффициент Пуассона породы, характеризующий её сжимаемость.

В свою очередь, давление $P_{ж}$ при детонации цилиндрического заряда ПВВ определяется соотношением вида:

$$P_{ж} = \frac{\Delta_{ВВ} \cdot D^2}{\gamma + 1}, \quad \text{Па}, \quad (17)$$

где $\Delta_{ВВ}$ - плотность заряжения ПВВ, кг/м³; D - скорость детонации, м/с.

Учитывая (16) и (17), а a - расстояние между зарядами в ряду и b - расстояние между рядами зарядов удовлетворяют соотношениям:

$$a \geq 2b_0 \quad \text{и} \quad b \geq 2b_0, \quad (18)$$

то выход негабарита определяется соотношением: $V_H^+ = V_e^+ \cdot (1 - \bar{q})$, %,

где V_H^+ - выход негабарита в развале, %; V_e^+ - содержание негабарита в массиве (до взрыва), %;

$$\bar{q} = d_{зп}^2 \Delta D^2 [(\gamma + 1)ab\sigma_{рас}]^{-1}. \quad \bar{q} = \frac{d_{зп}^2 \cdot \Delta_{ВВ} \cdot D^2}{(\gamma + 1) \cdot a \cdot b \cdot \sigma_{рас}}, \quad (20)$$

где $d_{зп}$ - диаметр зарядной полости, $d_{зп} = 2a_0$, м. При этом зона регулируемого дробления приближенно описывается соотношением $v_{ра} = 4b_0^2 l_{зп}$, а зона нерегулируемого дробления равна $v_{нл} = (ab - 4b_0^2) l_{зп}$. При условиях (18) параметр

$\bar{q} \leq 1$. Если же принять: $a \leq 2b_0$ и $b \leq 2b_0$,

то $\bar{q} \geq 1$ и выхода негабарита не будет, при исключении отрицательного взаимного влияния взрыва соседних зарядов на процесс разрушения ими породы. Соотношения (19) и (20) являются теоретическим обобщением известных результатов опытных и опытно-промышленных исследований д.т.н. Рубцова В.К. и хорошо согласуются с результатами последующих опытно-промышленных исследований других авторов. Таким образом, соотношения (16) - (21) впервые позволяют надежно прогнозировать значения первого главного критерия взрывного дробления горных пород - выход негабарита.

Как правило, степень дробления горных пород на карьерах оценивается средним размером кусков породы в развале - вторым главным критерием взрывного дробления горных пород на карьерах. Средний размер кусков породы в развале при $\bar{q} \leq 1$ определяется соотношением:

$$d_{cp} = l_{cp} \cdot [1 - \bar{q}(1 - \bar{d}_{cp,1})], \quad \text{М}, \quad (22)$$

где l_{cp} - средний размер кусков в массиве (до взрыва), м; $\bar{d}_{cp} = d_{cp,1}/l_{cp}$; $d_{cp,1}$ - средний размер кусков породы в зоне регулируемого дробления, т.е. при $r \leq b_0$. Очевидно, $d_{cp,1}$ определяется гранулометрическим составом раздробленной горной породы 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 горных пород – среднего размера кусков в развале, необходимо установить зависимость степени разрушения горных пород в зоне регулируемого дробления от свойств последних, типа промышленного взрывчатого вещества, схем расположения и инициирования зарядов. Известные соответствующие взаимосвязи, полученные в лабораторных и опытно-промышленных исследованиях, имеют частный характер и не позволяют установить обобщающих закономерностей. Теоретические же оценки имеют достаточно общий характер и не позволяют установить искомую зависимость для взрывного дробления пород на карьерах. Поэтому была поставлена задача по установлению обобщающей зависимости степени разрушения горных пород в зоне регулируемого дробления. В настоящей работе излагается новый теоретический подход к описанию процесса разрушения горных пород в зоне регулируемого дробления при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ, подтвержденный результатами лабораторных и промышленных исследований взрывного дробления.

• Лабораторные исследования взрывного дробления силикатных блоков

В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использовались заряды пиротехнического состава (ПС) длиной от 7,8 до 35,4 мм, диаметром от 3 до 7 мм и массой от 0,15 до 1 г. ПС представляет собой белый кристаллический порошок¹ с размерами частиц $0,25 \leq d_{uacm} \leq 0,5$ мм, который надежно инициируются в шнурах диаметром $d_{шн} \geq 1$ мм. Теплота взрывчатого превращения ПС составляла $Q_3=2512$ Дж/г; $Q_4=3350$ Дж/г; $Q_5=4187$ Дж/г; $Q_6=5024$ Дж/г. Последнее значение соответствовало чистому ПС, а уменьшение Q достигалось соответствующим добавлением чистого порошка поваренной соли. Иницирование зарядов ПС осуществлялось путем взрыва импульсом тока тонкой нихромовой проволокой. Опыты проводились в стальной металлической камере с плотно закрывающейся крышкой, с внутренними размерами 300×300×200 мм, при толщине стенок камеры равной 10 мм (рис. 1. а). Разрушению подвергались силикатные блоки размером 120×120×64 мм и 60×60×64 мм с плотностью $\rho_{пор} = 2,1$ г/см³. В первых 9 опытах обрабатывалась 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. Разрушен-

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

ная 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 объём песка исключался из объема соответствующих фракций. Всего проведено 19 серий опытов.

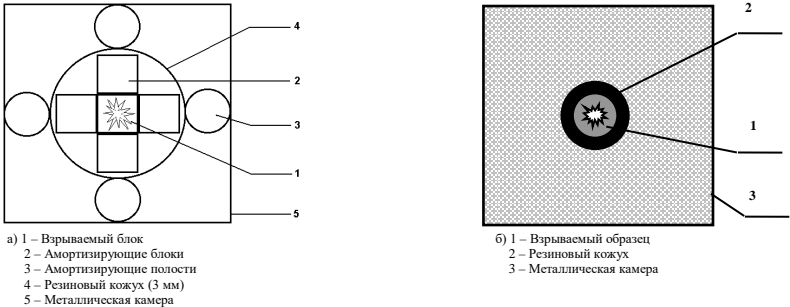


Рисунок 1 – Схема размещения взрывааемых образцов в камере.

При анализе результатов взрывного дробления силикатных блоков была принята модель их взрывного разрушения в виде (рис. 2):

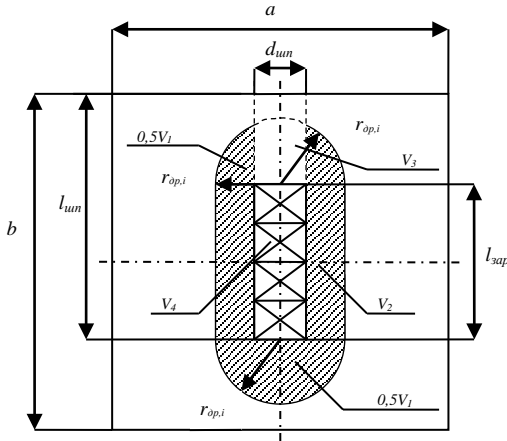


Рисунок 2 – Схема формирования зон разрушения.

$$V_{оп} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4, \quad (23)$$

где $V_1 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{оп}^3$ – объём раздробленной горной массы, приходящий на верхней и нижней части заряда; $V_2 = \pi \cdot l_{зар} \cdot r_{оп}^2$ – объём раздробленной горной массы, приходящий на всю длину заряда; $V_3 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{ун}^2 \cdot r_{оп}$ – объём зарядной полости в верхней части действия заряда, который не участвует в формирование грануло-

метрического состава; $V_4 = -\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_u^2 \cdot l_{zap}$ – объём зарядной полости по всей длине действия заряда, который не участвует в формировании гранулометрического состава. 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.

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 получают 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.

Последовательность расчета при анализе опытных данных

1. Объёмы каждой i -ой фракции:
$$V_{op,i} = \frac{m_{nop,i}}{\rho_{nop}}, \quad (24)$$

где $m_{nop,i}$ - массы i -ой фракции.

2. Сумма всех объемов фракций:
$$V_{op,k}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^k V_{op,i}^{(i)}; \quad 1 \leq i \leq k. \quad (25)$$

3. Средний размер кусков первых k фракций:
$$d_{\Sigma,k}^{cp} = \left(\sum_{i=1}^k m_{nop,i} \cdot d_{k,i}^{cp} \right) / \left(\sum_{i=1}^k m_{nop,i} \right). \quad (26)$$

4. \bar{d}_{cp} - относительные значения средних кусков:
$$\bar{d}_{cp,\Sigma} = \frac{d_{\Sigma,k}^{cp}}{l_k^{\max}}. \quad (27)$$

5. Нормированное значение относительных средних величин:
$$\hat{d}_{cp} = \frac{\bar{d}_{cp,\Sigma}}{\bar{d}_{cp}}. \quad (28)$$

6. r_{op} , мм - радиус зоны разрушения заданного уровня по соотношениям:

а) Удлиненный заряд:
$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{op}^3 + \pi \cdot l_{zap} \cdot r_{op}^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_u^2 \cdot r_{op} - \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_u^2 \cdot l_{zap} + V_{op} \right) = 0. \quad (29)$$

б) Сосредоточенный заряд:
$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{op}^3 + 0 \cdot r_{op}^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_u^2 \cdot r_{op} - \left(\frac{1}{8} \cdot \pi \cdot d_u^2 \cdot l_{zap} + V_{op} \right) = 0. \quad (30)$$

7. Параметр распределения дефектов:
$$\alpha = 0,5 \cdot \left(\frac{1}{\bar{d}_{cp,\Sigma}} - 1 \right). \quad (31)$$

8. Нормированное значения максимального размера кусков:
$$\bar{l}_{\alpha,k}^{\max} = \frac{l_{\alpha,k}^{\max}}{l_{on,\alpha}^{\max}}. \quad (32)$$

Для каждого процесса разрушения породы необходимо принимать свои опор-

ные значения. В зоне мелкодисперсного дробления в качестве опорного значения принимается $l_{on,1,3}^{max} = 1$ мм, а в зоне интенсивного трещинообразования $l_{on,2,3}^{max} = 5$ мм.

9. Опорные значения зон разрушения с внешними радиусами:

$$a) \quad r_{op,2} = r_{on,1}; \quad б) \quad r_{op,5} = r_{on,2}; \quad (33)$$

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

10. Рассчитывалось:

$$\bar{r}_{op} = \frac{r_{op,i}}{r_{on}}. \quad (34)$$

11. Теоретическое распределение кусков в зоне регулируемого дробления:

11.1. Взрыв удлиненного заряда:

$$\bar{l}_{T,K}^{max} = \left(\frac{r_{op}}{r_{on}} \right)^{4\alpha} = (\bar{r}_{op})^{4\alpha}. \quad (35)$$

11.2. Взрыв сосредоточенного заряда:

$$\bar{l}_{T,K}^{max} = \left(\frac{r_{op}}{r_{on}} \right)^{6\alpha} = (\bar{r}_{op})^{6\alpha}. \quad (36)$$

12. Рассчитывалось отношение:

$$\hat{l}_{T,K}^{max} = \frac{\bar{l}_{T,K}^{max}}{\bar{l}_{э,К}^{max}}. \quad (37)$$

Результаты обработки опытных данных для взрывного дробления силикатных блоков представлены на рис. 3. Они показывают распределение размеров кусков и удовлетворительно согласуются с предложенной моделью процесса формирования кусков породы в зоне регулируемого дробления.

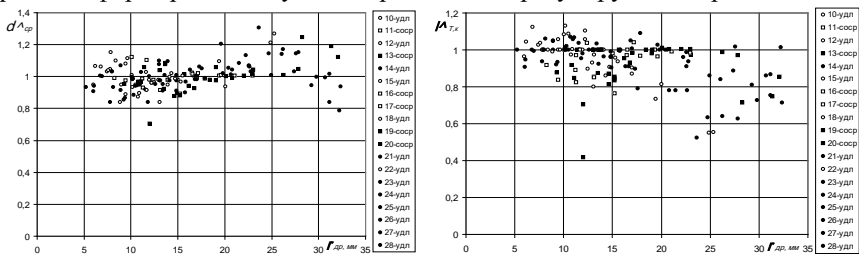


Рисунок 3 – Распределение относительных величин среднего и максимального размеров кусков породы с удалением от оси заряда.

• Лабораторные исследования взрывного дробления полигалитовых пород

В качестве ВВ 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. Опыты проводились с образцами цилиндрической формы из полигалитовых пород размерами 71×(67...84) мм и 69×(68...73) мм при средней плотности $\rho_{пор} = 2,4$ г/см³ в той же камере (рис. 1. б). В первой серии опытов отрабатывалась методика их проведения и системы амортизации, исключая соударения кусков породы со стенками камеры. Всего проведено 19 серий опытов. При анализе результатов опытов с образцами из полигалитовой породы использовалась та же модель, что и выше. В этом случае опорное значение в зоне мелкодис-

персного дробления принималось $l_{от,э,1}^{max} = 0,5$ мм, а в зоне трещинообразования $l_{от,э,2}^{max} = 5$ мм. Результаты обработки опытных данных со всеми образцами из полигалитовых пород представлены на рисунках 4. Как видно на рис. 3÷4, получилось удовлетворительное согласование теоретической модели с результатами взрывного дробления двух разных по свойствам пород.

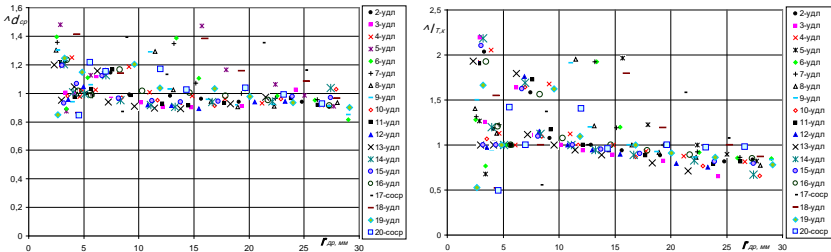


Рисунок 4 – Распределение относительных величин среднего и максимального размеров кусков раздробленной породы с удалением от оси заряда.

Следующим циклом работ изложено сопоставление результатов опытно-промышленного дробления пород на карьерах с приведенными выше теоретическими зависимостями.

Опытно-промышленные исследования взрывного дробления негабаритов известняка

Параметры зарядов промышленных взрывчатых веществ по взрывному дроблению негабаритов известняка на карьере «Жуково» ООО «Карбонат» приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры взрывных работ по дроблению негабаритов известняка

Показатели	№ негабарита (опыта)					
	7	8	9	10	11	12
Объем негабарита, м ³ (а×b×с)	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					
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. Разрушенная взрывом масса каждого негабарита сыпалась в мешки. Затем производились ее рассев и взвешивание фракций размером от 0,25 до 500 мм. Оценки разрушенных взрывом негабаритов известняка свидетельствует о том, что в этом случае имело место два разных процесса:

1) Интенсивное разрушение на куски размером до 50 мм в зоне при-

мыкающей к взрываемому заряду – условно этот процесс взрывного разрушения известняка считается как бризантное воздействие взрыва зарядов на известняк.

2) Разделение негабарита отдельными трещинами на куски 200 мм и более, считается, что этот процесс определялся поршневым эффектом воздействия на негабарит продуктов детонации (ПД) взорванного заряда промышленного взрывчатого вещества.

В диссертации анализируется процесс интенсивного бризантного дробления негабаритов известняка, взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ. При анализе результатов взрывного дробления негабаритов известняка была принята та же модель, что и выше (рис. 2). Обработка опытных данных проводилась по соотношениям (24) – (37), при расчёте суммы объемов первых k фракций $1 \leq k \leq 14$. В зоне мелкодисперсного дробления в качестве опорного значения принимается $\hat{l}_{оп1}^{max} = 0,5$ мм, а в зоне интенсивного трещинообразования $\hat{l}_{оп2}^{max} = 5$ мм; – опорные значения радиусов зон разрушения:

$$\text{а) } r_{оп1} = r_{др2}; \quad \text{б) } r_{оп2} = r_{др6};$$

где $r_{др2}$ – внешний радиус зоны дробления, максимальный размер куска в которой равен 0,5 мм; $r_{др6}$ – внешний радиус зоны, максимальный размер куска в которой равен 5 мм.

В описываемых опытах дробления негабаритов известняка осуществлялось взрывом сосредоточенных зарядов (табл. 1). В качестве примера в табл. 2 приводятся результаты расчетов для 7-го опыта. Результаты обработки опытных данных по бризантному дроблению части негабаритов известняка представлены на рис. 5. При анализе опытных данных были использованы приведенные выше соотношения (15), (30)–(31), (36)–(37), которыми описываются две модели разрушения породы взрывом зарядов промышленных взрывчатых веществ. Соотношением (15) описывается процесс формирования кусков породы вследствие развития отдельных трещин в конических секторах, а соотношениям (30) – формирование зон разрушения соответствующих конкретному объему первых k фракций. Основная часть экспериментальных точек расположена около $\hat{l}_{тk}^{max} = 1$ и $\hat{d}_{сп}^{\circ} = 1$ (рис. 5), подтверждая тем самым достоверность предложенных соотношений по оценке степени трещинообразования – формирования кусков и объемов соответствующих разрушений.

При этом отличия опытных данных от теоретических не превышает 20%. Наибольшие отличия опытных значений от теоретических $\hat{l}_{тk}^{max} = 1$ и $\hat{d}_{сп}^{\circ} = 1$ 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 мел-

Таблица 2 – Результаты расчетов опыта №7 дробления негабаритов известняка

к, № фракц.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$d, \text{мм}$	$\leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 2$	$2 < d \leq 3$	$3 < d \leq 5$	$5 < d \leq 7$	$7 < d \leq 10$	$10 < d \leq 15$	$15 < d \leq 20$	$20 < d \leq 30$	$30 < d \leq 40$	$40 < d \leq 50$	$50 < d \leq 500$
l_k^{\max}	0,25	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	500
$d_k^{\text{ср}}, \text{мм}$	0,12	0,375	0,75	1,5	2,5	4	6	8,5	12,5	17,5	25	35	45	275
$m_{\text{пор}}, \text{Г}$	15	157	536	623	150	543	615	940	1492	2056	960	2099	3185	470898
$V_{\text{др}k}, \text{см}^3$	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
$V_{\text{др}k}^{\Sigma}, \text{см}^3$	5,836	66,923	208,6	450,951	509,3	720,6	959,9	1326	1906,1	2706	3079,6	3896	5135,5	188355
$d_{\Sigma k}^{\text{ср}}, \text{мм}$	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
$\bar{d}_{\text{ср}\Sigma}$	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
$\hat{d}_{\text{ср}}^{\circ}$	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
$r_{\text{др}}, \text{мм}$	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
$\bar{l}_{\text{ч}k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10	100
$\bar{r}_{\text{др}}$	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
$\bar{l}_{\tau k}^{\max}$	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
$\hat{l}_{\tau k}^{\max}$	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

кодисперсной фракции породы, чем частично и обусловлен указанное отличие опытных данных от теоретических оценок. Вместе с тем необходимо отметить, что 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 (15) и (30). То есть предложенные указанными выше соотношениями описание процесса трещинообразования и формирования соответствующих объемов надежно описывают процесс разрушения горных пород $d_{\text{част}} > 3$ мм. Объем 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 (15), (30) будет обусловленная в основном вариацией опытных данных при определении объемов более крупных фракций. Экспериментальные исследования, выполненные в натуральных условиях, удовлетворительно согласуются с предложенной теоретической моделью процесса формирования кусков породы в зоне регулируемого дробления. Так по предложенной теоретической модели с погрешностью $\pm 20\%$, могут быть рассчитаны или спрогнозированы объемы регулируемого дробления и средний размер кусков породы в этой зоне. 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.

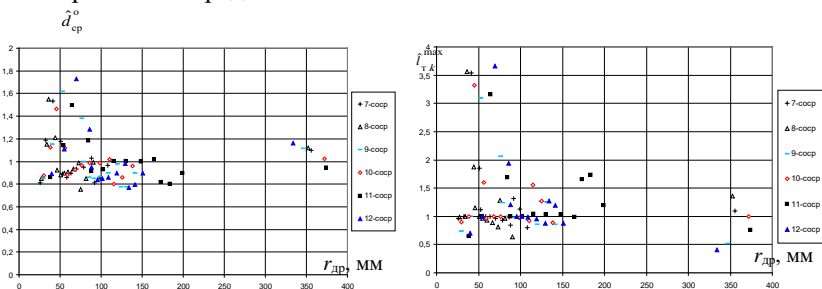


Рисунок 5 – Распределение относительных величин среднего и максимального размеров кусков породы с удалением от оси заряда.

Экспериментальные исследования, выполненные в натуральных условиях, удовлетворительно согласуются с предложенной теоретической моделью процесса формирования кусков породы в зоне регулируемого дробления и сформулировано второе научное положение: **формирование объемов разрушения клиновидных секторов происходит отдельными трещинами в зависимости от прочностных свойств пород, диаметра заряда и давления продуктов детонации в детонационной волне.**

Предложенные соотношения позволяют с погрешностью $\pm 20\%$ прогнозировать формирование гранулометрического состава горной массы и средний размер кусков породы в зоне регулируемого дробления. Экспериментальные исследования позволили разработать Рекомендации по рациональным параметрам взрывного дробления горных пород на карьерах.

Опытно-промышленные исследования взрывного дробления известняка

Условия проведения опытно-промышленного взрыва на Мончаловском месторождении известняков на карьере «Жуково» ООО «Карбонат»:

1. Разрушаемая порода – известняк;
2. Крепость пород по СНИП – VII-ая группа;
3. Плотность породы $\rho_{\text{пор}} = 2,36 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
4. Трещиноватость – третья категория по В. К. Рубцову при среднем размере кусков породы в массе $l_{\text{ср}} = 1 \text{ м}$;
5. Размер негабарита равен 0,6 м. Его содержание в массиве до взрыва составляет $\sim 20\%$;
6. Взрывчатое вещество – Гранулит РП;
7. Количество скважин – 9 шт;
8. Обводненность скважин – сухие;
9. Способ инициирования зарядов — электрический, с использованием ЭДЗИ с применением промежуточных детонаторов, опущенных в скважину;
10. Промежуточные детонаторы – Гранулит РП (измельченный, 3 кг) и аммонал-200 – 200 г;
11. Схема инициирования – порядная;
12. Буровое оборудование – буровые станки (пневмоударного бурения) СБУ-100.

Предлагаемые параметры размещения скважин на уступе рассчитаны по (16) и (21) в виде: $a = b = a_0 \sqrt{P_{\text{ж}} / \kappa_s \sigma_{\text{рас}}} = 2,4 \text{ м}$.

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. То есть в развале не будет негабаритных кусков, имеющих в массиве до взрыва и сохраняющихся после взрыва в зоне нерегулируемого дробления.

Параметры взрывных работ при серийных и опытно-промышленном взрывах на карьере «Жуково» ООО «Карбонат» приведены в табл. 3.

В соответствии с изложенной выше теорией рассчитаем ориентировочно выход негабарита при серийном взрывании. В этом случае при взрыве удлиненного заряда формируется зона регулируемого дробления $v_{\text{ра}} = 2,4^2 l_{\text{зр}} = 5,76 l_{\text{зр}}$. Общий же объем разрушения приходящийся на взрыв одного заряда $v_{\text{зр}} = 3,5^2 l_{\text{зр}} = 12,25 l_{\text{зр}}$. Объем зоны нерегулируемого дробления бу-

дет равен $v_{\text{из}} = 6,49I_{\text{др}}$. Следовательно, выход негабарита при серийном взрывании будет равен $v_{\text{из}}^+ = \frac{v_{\text{из}}}{v_{\text{др}}} \cdot v_{\text{с}}^+ = \frac{6,49}{12,25} \cdot 20 = 10,6\%$, где $v_{\text{с}}^+ = 20\%$ – содержание не-

габарита в массе до взрыва. Это оценка практически полностью согласуется с результатами серийного взрывания.

Таблица 3 – Параметры взрывных работ известняков.

	Показатели	Единицы измерения	Серийный вариант	Опытно-промышленный взрыв
1.	диаметр скважин	мм	110	110
2.	емкость 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 заряжания	кг/м ³	0,75	0,75
12.	выход негабарита	%	10	<1
13.	средний размер кусков в развале	м	0,24	0,17

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 (см. рисунок 6), на которых видно, что в это случаи на поверхности развала негабарита нет. При экскавации горной массы негабарита не было и внутри развала, а средний размер кусков получился равным $d_{\text{ср}}=0,17$ м.



Рисунок 6 – Опытно-промышленное взрывное дробление известняка.

* По Типовому проекту БВР $q = 0,46$ кг/м³ принимается из справочника: Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Гуров Н.В., Кантор В.Х. Нормативный справочник по буровзрывным работам. – М.: Недра, 1986. – 511 с.

Проведенный опытно-промышленный взрыв дробления известняка на карьере «Жуково» подтвердил основные положения разработанной теории дробления горных пород взрывом скважинных зарядов промышленных взрывчатых веществ на уступах карьеров и позволил сформулировать третье научное положение: *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.*

По предложенным параметрам буровзрывных работ имело место безнегабаритное взрывное дробление известняка с существенным снижением (на 30%) среднего размера куска в развале до $d_{cp}=0,17$ м. При серийном же взрывании выход негабарита составляет 10% при среднем размере кусков в развале $d_{cp}=0,24$ м.

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, обеспечивающих заданную степень взрывного дробления пород.

По результатам выполненных исследований сформулированы следующие основные выводы:

1. Установлено, что соотношением: $b_s = a_0 \cdot \sqrt{P_{sc} / \sigma_{св}}$ 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 взрывааемых 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 соответствующий, по которой внешний радиус зоны дез-

интеграции клиновидных секторов имеет место при значениях 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 , $l_{он}$ и $r_{он}$ 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 , $l_{он}$ и $r_{он}$ характеризующих особенности строения 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. // ГИАБ, №2. – М.: МГУ, 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 ГИАБ, №ОВ7. – М.: Изд-во «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 ГИАБ, №ОВ7. – М.: Изд-во «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 ВУЗ. Горный журнал, №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. // Сб. «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. // ГИАБ, №4. – М.: Изд-во «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. // ГИАБ, №5. – М.: Изд-во «ГОРНАЯ КНИГА», 2011. – С. 347-351.

8. Сенченко Д.С., Докутович М.И. Геоэкологические аспекты взрывных работ на месторождениях известняка. // ГИАБ, №8. – М.: Изд-во «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, №5. – М.: 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 granulometric composition of 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 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.

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.