

На правах рукописи

Мысин Алексей Владимирович



**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРОВЗРЫВНЫХ
РАБОТ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОЙ
РУДЫ ВЫСОКИМИ УСТУПАМИ**

*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

Санкт-Петербург - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор

Парамонов Геннадий Петрович

Официальные оппоненты:

Белин Владимир Арнольдович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор Московского Горного института

Возгрин Роман Александрович

кандидат технических наук, Научный центр безопасности технических систем 12 Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны Российской Федерации "НИЦ БТС 12 ЦНИИ", научный сотрудник

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева» (КузГТУ)

Защита состоится 26 декабря 2019г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 221.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 октября 2019г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В современных условиях мировой экономики для сохранения конкурентоспособности российских предприятий черной металлургии необходимо поддержание достигнутого уровня производства железорудного сырья. Задаче экологических и энергосберегающих технологий в минерально-сырьевом секторе соответствует применение высокоуступной отбойки при открытой разработке железорудных месторождений. Это позволяет ликвидировать отставание вскрышных работ, увеличить производительность добычного горного оборудования на 8-10%. Наиболее полное и экономичное использование машин и механизмов при разработке железорудных месторождений может быть достигнуто качественной взрывоподготовкой горной массы. С одной стороны, применение высокоуступной технологии приводит к повышению рационального использования пробуренных скважин, равно как и увеличению полезного использования энергии взрыва на дробление. А с другой стороны, перед комплексом буровзрывных работ встает задача (формирование труднопреодолимых линий сопротивления по подошве со сложными горно-геологическими условиями железорудных месторождений), решение которой необходимо для получения качественной подготовки взорванной горной массы.

Анализ существующих способов буровзрывных работ, применяемых при взрывании высоких уступов, отражает необходимость в совершенствовании технологий, и в частности, в разработке новых конструкций скважинных зарядов, обеспечивающих заданную степень дробления и качественную проработку подошвы уступа. Это представляет собой важную задачу, успешное решение которой позволяет повысить эффективность буровзрывных работ в условиях отработки железной руды высокими уступами.

Степень разработанности исследуемого направления:

Стремительный научно-технический прогресс во всех отраслях промышленности, обеспечил существенное совершенствование горного производства, в том числе взрывных

работ. Результатом является развитие представлений о механизме разрушения горных пород действием взрыва. Существенные успехи в этой области науки достигнуты благодаря работам отечественных и зарубежных ученых: Ф.И. Кучерявого, М.А. Лаврентьева, Г.И. Покровского, Я.Б. Зельдовича, О.Е. Власова, В.М. Комира, К.П. Станюковича, Г.П. Демидюка, О.О. Вовка, С.Д. Викторова, Э.И. Ефремова, Н.И. Казакова, А.Н. Ханукаева, В.А. Боровикова, Ф.И. Ванягина, А.П. Андриевского, Б.Н. Кутузова, В.А. Белина, Г.П. Парамонова, Б.Н. Ракишева и др.

Решению весьма актуальной задачи взрывного дела - изысканию метода, который бы сочетал в себе управление качеством проработки подошвы уступа при заданной степени дробления горных пород в условиях взрывания высоких уступов, посвящен ряд научных работ и исследований известных ученых: Мосинца В.Н., Рубцова С.К., Викторова С.Д., Галченко Ю.П., Закалинского В.М. - предлагающие применять сближенные и параллельно-сближенные или наклонные заряды; Дугарцыренова А.В., Кима С.И., Должикова К.И., Гончарова С.А. - использовать для этой цели создание котла или термическое расширение скважины в донной части; Мельникова Н.В., Марченко Л.Н. Машукова В.И. - рассредоточение заряда воздушными промежутками; Новожилова М.Г., Друкованного М.Ф., Ефремова Э.И. - взрывание на неубранный забой. Однако, применение предложенных вариантов решения данной задачи в условиях рыночной экономики, в техническом и технологическом плане требует дальнейшего развития.

Цель диссертационной работы. Повышение эффективности буровзрывных работ при высокоуступной отработке месторождений железной руды за счет повышения качества проработки подошвы уступов.

Идея диссертационной работы заключается в усилении динамического воздействия продуктов детонации и волны напряжений на донную часть скважины за счет изменения конструкции заряда.

Основные задачи исследования:

1. Анализ методов взрывного разрушения массива

железистых кварцитов при обработке месторождений высокими уступами;

2. Экспериментально-аналитические исследования влияния удельной энергии взрывчатого вещества на размеры зон дробления, трещинообразования и откола;

3. Разработка конструкции скважинного заряда, взрывание зарядов которой обеспечивает качественную проработку подошвы высоких уступов на железорудных карьерах;

4. Натурные испытания скважинных зарядов с разделением частей инертным профилированным промежутком на карьерах, ведущих разработку высокими уступами.

5. Техничко-экономическая оценка эффективности применения разработанной конструкции заряда на примере Лебединского ГОКа.

Методология и методы научных исследований. Анализ и обобщение современных представлений о взрывном разрушении горных пород; методы математической физики, методы физического и математического моделирования быстротекающих процессов, методы математической статистики, натурных исследований действия взрыва скважинных зарядов, технико-экономического анализа. При выполнении экспериментальных исследований использованы современные методы и способы регистрации быстротекающих процессов. Для реализации поставленной цели диссертационной работы использовалась лабораторная база кафедры Взрывного дела Санкт-Петербургского Горного университета.

Научная новизна:

1. Установлены зависимости распределения эквивалентных напряжений в разрушаемом массиве горных пород на уровне подошвы уступа при взрыве скважинных зарядов взрывчатых веществ сплошной и комбинированной конструкций.

2. Установлена зависимость изменения давления продуктов взрыва во времени в зарядной камере для комбинированного скважинного заряда с профилированным инертным промежутком.

Защищаемые научные положения:

1. Размещение комбинированного профилированного заряда взрывчатого вещества в нижней части скважины при взрывании 20-

30 метровых уступов железных руд приводит к увеличению перехода энергии заряда в энергию волны напряжений до 7%.

2. Разделение частей скважинного заряда профилированным инертным промежутком обеспечивает увеличение продолжительности динамического нагружения донной части скважины до 15мс.

3. Наиболее эффективное действие по разрушению горной породы с применением комбинированной конструкции скважинного заряда, части которого разделены профилированным инертным промежутком, достигается размещением частей заряда в соотношении 0,3 - (низ):0,7 - (верх) от высоты уступа.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Определены размеры зон разрушений и величина линии наименьшего сопротивления с учетом физико - технических свойств горных пород при взрыве одиночного скважинного комбинированного заряда.

2. Разработаны и внедрены в производство комбинированные скважинные заряды, обеспечивающие более интенсивную по сравнению с принятой технологией проработку подошвы на железорудном карьере предприятия ОА «Лебединский ГОК».

Достоверность научных положений и результатов исследования обеспечивается значительным объемом проанализированных теоретических и экспериментальных исследований о методах и способах взрывного разрушения массива горных пород при отработке месторождений высокими уступами, современными программными продуктами численного моделирования быстропротекающих процессов, удовлетворительной сходимостью математических моделей с данными экспериментов; результатами промышленных опытов и практической реализацией разработанных рекомендаций при производстве массовых взрывов на месторождении железистых кварцитов «Лебединское».

Апробация работы. Содержание и основные положения диссертационной работы были представлены на научных конференциях и конкурсах (2015-2019гг.): «Topical Issues of Rational

Use of Natural Resources» (г. Санкт-Петербург.); «Socio-economic and environmental problems of the mining industry, building and energetics» (г. Тула.); «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (г. Санкт-Петербург); International University of Resources Scientific (Фрайбергская Горная Академия, г. Фрайберг, Германия, 2017г.). Работа обсуждалась на заседаниях кафедры взрывного дела и НТС Санкт-Петербургского Горного университета.

Личный вклад автора: заключается: в сборе и анализе существующих исследований по решению проблемы качественной проработки подошвы уступа взрывом при обеспечении заданного гранулометрического состава; постановке задач исследований; в разработке и выполнении численных экспериментов; участии в проведении лабораторного и промышленного эксперимента; анализе и обработке полученных результатов; в разработке новой конструкции скважинного заряда и рекомендаций по ее применению на железорудных карьерах.

Реализация результатов работы.

1. На основе научно обоснованных рекомендаций, на карьере АО «Лебединский ГОК» внедрена конструкция комбинированного скважинного заряда, обеспечивающая качественную проработку подошвы уступа (отсутствуют пороги), средний диаметр куска разрушенной горной массы уменьшился от 1,18 м до 0,96 м, что привело к увеличению технической производительности экскаватора ЭКГ-8И на 10%.

2. Разработанная методика численного моделирования действия взрыва может быть использована при проектировании взрывных работ в сложных горно-геологических условиях.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 3 печатных работах в научных специализированных изданиях, входящих в перечень ВАК России, получен 1 патент.

Структура и объем работы. Диссертационное исследование включает в себя введение, четыре главы, заключение и библиографический список, изложенные на 131 странице машинописного текста, содержит 50 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 155 наименований.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, профессору Парамонову Геннадию Петровичу, доценту Миронову Юлию Альбертовичу и сотрудникам кафедры Взрывного дела за ценные советы и рекомендации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность, основная цель, идея, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены перспективы интенсификации добычи железных руд открытым способом, представлен анализ научных исследований применения высоких уступов при разработке месторождений железной руды открытым способом, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе изложены результаты теоретических исследований динамического воздействия комбинированного скважинного заряда взрывчатого вещества на массив горных пород. Приведены методы расчета радиусов зон разрушений с учетом конструктивных и энергетических особенностей колонки скважинного заряда.

В третьей главе обоснован выбор методики исследования быстропротекающих процессов, приведены результаты модельного эксперимента, численного моделирования для изучения интенсивности разрушений в горной породе, вызванных взрывом; приведено сравнение результатов лабораторного эксперимента и численного моделирования.

Четвертая глава посвящена промышленным испытаниям и разработке научно-обоснованных рекомендаций по применению комбинированной конструкции скважинного заряда с разделением частей инертным профилированным промежутком, приведена экономическая оценка использования предложенной технологии распределения энергии взрыва на примере месторождения железистых кварцитов «Лебединское».

В заключении приводятся основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Основные результаты исследований отражены **в защищаемых положениях:**

1. Размещение комбинированного профилированного заряда взрывчатого вещества в нижней части скважины при взрывании 20-30 метровых уступов железных руд приводит к увеличению перехода энергии заряда в энергию волны напряжений до 7%.

В результате исследований, выполненных в течение последних десятилетий, сложились четкие представления о механизме разрушения горных пород действием взрыва, роли волн напряжений, возникающих в породе при взрыве заряда ВВ, и энергии, остающейся в продуктах детонации после генерирования волны напряжений.

Как показал проведенный анализ, существует значительное количество различных методов и формул для расчета параметров типовых проектов буровзрывных работ. Но их все можно разделить на две группы: формулы, полученные на основе экспериментальных результатов, и формулы, выведенные при помощи теоретических исследований.

Известно, что при проведении буровзрывных работ на высоких уступах 20-30 метров формируется труднопреодолимая линия наименьшего сопротивления в области подошвы уступа. В данной работе в рамках первого этапа проведено исследование значений ЛНС исходя из геометрических параметров уступов на карьере «Лебединского» месторождения. Предельная величина ЛНС определяется согласно принятым правилам безопасности при взрывных работах и должна удовлетворять условию:

$$W_{\delta} = B + H \operatorname{ctg} \alpha \leq W, \quad (1)$$

где W_{δ} - максимально допустимая величина ЛНС, м; H - высота уступа, м; α - угол откоса уступа, град.; $B = 3$ м - берма безопасности, м.

При бурении на карьере «Лебединского» месторождения применяются буровые станки типа СБШ-250МН, шарошечные долота диаметром 244,5 и 250,8 мм. Применяемые взрывчатые вещества - Тован 60/40, Тован 25/75, основные характеристики которых приведены в таблице 1. Полученные результаты расчета величин ЛНС для безопасного ведения работ приведены в таблице 2.

Таблица 1 - Основные характеристики используемых взрывчатых веществ

Показатель	Тован 25/75	Тован 60/40	Гранулотол
Теплота взрыва, кДж/кг	3620	3351	4116
Плотность заряжания, кг/м ³	1200	1200	1000
Скорость детонации, м/с	4600	4400	5200

Таблица 2 - Расчетные величины линии наименьшего сопротивления

Высота уступа, м	Угол откоса уступа, град.	Величина ЛНС, м
20	75	8,4
22		8,9
24		9,4
26		9,9
28		10,5
30		11

На втором этапе проведен расчет величин ЛНС с учетом физико-технических свойств различных типов железистых кварцитов (таблица 3) «Лебединского» месторождения, характеристик применяемых взрывчатых веществ на основе суммирования размеров откольной зоны, зон дробления и трещинообразования по различным методикам расчетов (таблица 4). Результаты расчетов сведены в таблицу 5.

Таблица 3 - Прочностные свойства кварцитов [ФГУП ВИОГЕМ]

Показатель	Магнетитовые	Гематит- магнетитовые	Малорудные
Плотность, кг/м ³	3570	3460	3006
Скорость продольной волны в массиве, м/с	5730	5590	5950
Скорость поперечной волны в массиве, м/с	3250	3225	3450
Коэффициент Пуассона	0,24	0,25	0,29
Предел прочности на сжатие, МПа	118	143	175
Предел прочности на растяжение, МПа	22	24	31

Показатель	Магнетитовые	Гематит-магнетитовые	Малорудные
Предел прочности на сдвиг, МПа	32,5	35,6	38,4
Модуль Юнга, ГПа	117	107	106

Таблица 4 - Методики, использовавшиеся для расчета величины ЛНС

Авторы методики	Расчетные формулы
Кутузов Б.Н., Андриевский А.П.	<p>Радиус зоны смятия:</p> $R_{см} = d \cdot \sqrt{\frac{\rho_{вв} \cdot D^2}{8 \cdot \sigma_{сж}}}, \text{ м}$ <p>Радиус зоны трещинообразования:</p> $R_{тр} = 1,4 \cdot R_{см} \sqrt{\frac{P_n \cdot r_0}{R_{см} \cdot \sigma}}, \text{ м}$
Друкованный М.Ф.	<p>Радиус зоны мелкого дробления:</p> $R_{м.др} = r_0 \cdot \left(\frac{P_n}{-\left(\frac{k}{f}\right) + \left[\sigma_c + \left(\frac{k}{f}\right)\right] \cdot \left[\frac{\mu}{\sigma_{сж} \cdot \left(1 + \ln \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{раст}}\right)} \right]^{\frac{f}{1+f}}} \right)^{\frac{1}{2 \cdot f}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\sigma_{сж} \cdot \left(1 + \ln \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{раст}}\right)}}, \text{ м}$ <p>Радиус зоны радиальных трещин:</p> $R_{тр} = \left(\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{раст}} \right) \cdot R_{м.др}, \text{ м}$

Авторы методики	Расчетные формулы
Ракишев Б.Н.	<p>Радиус зоны смятия:</p> $R_{см} = r_{нд} \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot C_p^2}{5 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{0,5}, \text{ м}$ <p>Радиус зоны трещинообразования:</p> $R_{тр} = R_{см} \cdot \frac{\nu}{1 + \nu} \cdot \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{раст}}, \text{ м}$
Боровиков В.А., Ванягин И.Ф.	$\sigma_{сов.мах}(\bar{R}_{оп}) = \frac{\sigma_{rмах}(\bar{R}_{оп}) - \sigma_{\phiмах}(\bar{R}_{оп})}{2} \geq [\sigma_{сов}^{\partial n}]$ $\sigma_{\bar{\phi}мах}(\bar{R}_{тр}) \geq [\sigma_{раст}^{\partial n}]$

Расчет размеров откольной зоны производился по методике, предложенной В.А. Боровиковым, И.Ф. Ванягиным из условия:

$$[\sigma_{отп}^{\partial n}] = -\sigma_{rмах}(W+h) + \sigma_{rмах}(W+h) \cdot F(r,t) \quad (2)$$

где: $-\sigma_{rмах}(W+h)$ - максимальное напряжение в отраженной волне, Па; $\sigma_{rмах}(W+h)$ - максимальное напряжение в прямой волне, Па; $F(r,t)$ - функция, описывающая форму волны напряжения, Па.

Таблица 5 - Значения параметров зон разрушения, откольных слоев и полученные ЛНС для магнетитовых кварцитов

Зоны разрушения	Результаты расчетов по приведенным методикам			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
$R_{см}$, м	0,46/0,65	0,59/0,74	0,63/0,72	0,52/0,67
$R_{тр}$, м	3,63/4,39	3,78/4,56	3,7/4,62	3,12/4,94
Расчет откольных слоев				
hI , м	2,23/3,11	2,68/3,43	2,24/3,17	2,84/3,66
W , м	6,32/8,15	7,05/8,73	6,57/8,51	6,48/9,27

Примечание: через знак «/» указаны результаты расчетов для ВВ «Тован» 25/75 и гранулол соответственно.

По методике Н.Н. Казакова проведена оценка количества энергии идущей на дробление горных пород на волновой стадии. Энергия разрушения волновой стадии взрыва определяется как

сумма излученной энергии в цилиндрическую и сферическую волны из выражения:

$$\mathcal{E} = \frac{\pi \cdot h \cdot R \cdot g}{E} \left[\int_0^{\hat{}} ((\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2) - 2 \cdot \mu \cdot (\sigma_r \cdot \sigma_\theta + \sigma_\theta \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_r)) \cdot d \cdot \lambda \right] \quad (3)$$

где: h - длина скважинного заряда, м; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ - составляющие тензора напряжений, Па; μ - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости, Па; R - радиус цилиндрической поверхности, м. Результаты расчетов приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Расчетные величины количества энергии

Фазы процесса	Энергия, МДж		
	Тован 25/75	Тован 40/60	Гранулотол
Волны напряжений	141,6	126,6	145,8
-цилиндрическая волна	137,3	123,0	141,4
- сферическая волна	4,3	3,6	4,4

Анализ результатов проведенных исследований по сравнению преодолеваемых величин линии наименьшего сопротивления в донной части скважины при отработке железорудных месторождений уступами 20-30 метров с учетом физико-технических свойств горных пород показал, что динамическое нагружение горной породы размещенным в нижней части заряда взрывчатым веществом с высокой концентрацией энергии (гранулотол) по сравнению с эмульсионными взрывчатыми веществами (Тован 25/75;60/40) выше на 18-22%, а количество энергии в волне напряжений выше на 7%.

2. Разделение частей скважинного заряда профилированным инертным промежутком обеспечивает увеличение продолжительности динамического нагружения донной части скважины до 15 мс.

Для определения действия заряда разработанной конструкции в производственных условиях были выполнены лабораторные эксперименты на моделях из блока железистых кварцитов Лебединского месторождения с соблюдением максимального количества критериев подобия, на основании методик разработанных В.А. Боровиковым, А.В. Федосеевым.

В монолитном блоке железистого кварцита был пробурен шпур диаметром 4 мм, в который был помещен заряд тэна плотностью 0,88 г/см³. Для создания условий разрушения, подобных взрыву на уступе карьера, модель зажималась в специальном приспособлении в соответствии с рисунком 1.

Результаты лабораторных экспериментов были приняты за основу для разработки модели разрушения горных пород взрывом скважинного заряда в трехмерной постановке. Численное моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS/Autodyn. Как показано на рисунке 2, геометрия модели выполнена согласно линейным параметрам блока горной породы, на котором проводился модельный эксперимент.

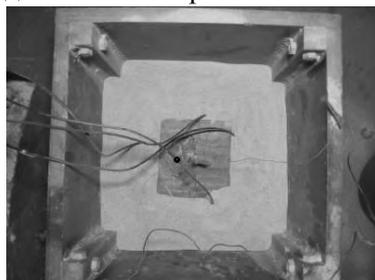


Рисунок 1 - Блок горной породы, подготовленный к эксперименту

Для определения поведения взрывчатого вещества и продуктов детонации, используемых в инженерном расчете, использовалось уравнение состояния Джонса-Уилкинса-Ли (JWL), которое определяет связь между давлением и удельным объемным отношением газообразных продуктов реакции детонации, определяется зависимостью:

$$P = A \exp(-R_1 v) + B \exp(-R_2 v) + C v^{-(w+1)} \quad (4)$$

где A, R_1, B, R_2, C, w - эмпирические константы; P - гидростатическое давление, Па.

В качестве уравнения состояния описывающее поведение горной породы выбрано полиномиальное, которое включает в себя

уравнение ударной адиабаты:

$$P = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (T_0 + T_1 \mu) \cdot \rho_0 e \quad (5)$$

$$U = c_0 + s \cdot u_p \quad (6)$$

Прочность горной породы описывается *JH-2* - моделью прочности (Johnson-Holmquist -II).

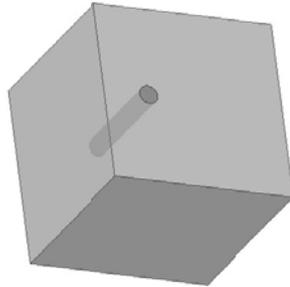


Рисунок 2 - Геометрия модели разрушения горных пород взрывом скважинного заряда в трехмерной постановке

Для оценки результатов испытаний необходимо сравнить характеристики, которые бы отображали действие взрыва на горную породу. В данном случае характеристиками, отражающими поведение блока горной породы под динамическим воздействием взрыва, являются параметры движения среды. В результате модельного эксперимента были сняты осциллограммы, представляющие собой зависимости радиального ускорения рудного тела от времени при помощи деформационно-защищенных акселерометров и цифрового осциллографа TDS3034B. Затем определялись значения величин скоростей смещений путем интегрирования акселерограммы по времени. Местоположение датчиков на физической и численной модели определялось их координатами. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

В качестве критерия оценки сходимости результатов экспериментов используется анализ гранулометрического состава (рисунки 4,5).

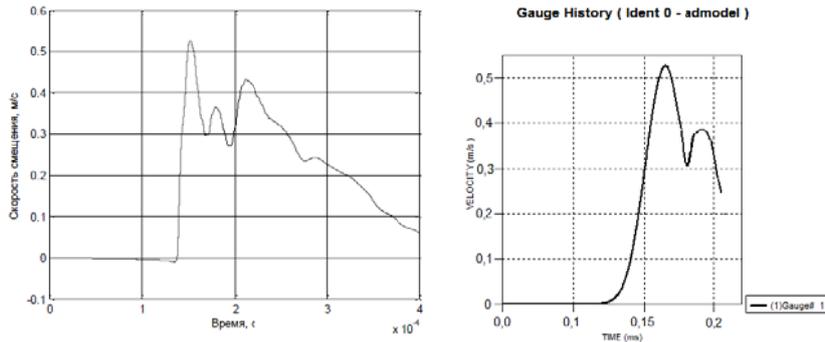


Рисунок 3 - Велосиграммы, полученные с модельного блока и датчика на численной модели

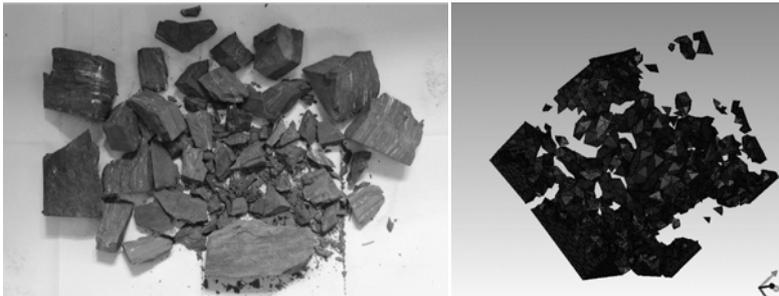


Рисунок 4 - Результаты испытания на блоке железистых кварцитов

На основе верифицированной модели были проведены численные расчеты действия взрыва скважинных зарядов различных конструкций (сплошной заряд; комбинированный заряд из двух разнотипных взрывчатых веществ с различной энергетикой; комбинированный заряд из двух разнотипных взрывчатых веществ, разделенных инертным профилированным промежутком). При взрыве скважинного заряда с профилированным инертным промежутком, можно отметить, что максимальные разрушения формируются на уровне подошвы уступа (рисунок 6). На рисунках 7(а,б) приведены зависимости изменения давления от времени нагружения для разных конструкций скважинных зарядов.

3. Наиболее эффективное действие по разрушению горной породы с применением комбинированной конструкции

скважинного заряда, части которого разделены профилированным инертным промежутком, достигается размещением частей заряда в соотношении 0,3 - (низ):0,7 - (верх) от высоты уступа.

На характер разрушения массива горных пород значительное влияние оказывают форма и конструкция заряда взрывчатого вещества, и от них во многом зависит степень дробления горной массы. Известно, повысить эффективность взрыва скважинных зарядов можно за счет более качественного запирания продуктов взрыва в зарядной полости. Поэтому, изменяя конструкцию заряда и используя профилированный инертный промежуток, осуществляется управление действием взрыва. Для изучения, влияния энергии взрыва разработанной конструкции комбинированного скважинного заряда с профилированным промежутком на разрушаемый массив горных пород были проведены опытно-промышленные испытания.

Опытно-промышленные взрывы были осуществлены на карьере месторождения «Ильмениоки». Выбор этого месторождения для эксперимента обусловлен достаточно сложной совокупности физико-технических свойств горных пород и умеренной обводненности, что позволяет обобщить результаты экспериментальных взрывов для целого ряда месторождений с похожими физико-техническими свойствами горных пород. Коэффициент крепости горных пород равен 12. Предел прочности при сжатии и растяжении составляет соответственно - 120 МПа и 12 МПа. В таблице 7 приведены характеристики исследуемых конструкций зарядов, а на рисунке 8 схематично представлены сами конструкции скважинных зарядов. Инертный профилированный промежуток в скважине размещался таким образом, что соотношение частей комбинированного заряда от высоты уступа составляло для: 1 скважины - 0,2:0,8; 2 скважины - 0,25:0,75; 3 скважины - 0,3:0,7; 4 скважины - 0,35:0,65; 5 скважины - 0,4:0,6.

Для измерения скорости детонации использовались приборы DataTrapII VOD и MicroTrap. Результаты измерений сведены в таблицу 8, а на рисунке 9 показан график изменения скорости детонации по длине скважины.

Таблица 7 - Характеристики исследуемых конструкций скважинных зарядов

Конструкция заряда	Взрывчатое вещество	Величина заряда	Иницирующий заряд
Сплошная (А)	Fortis Advantage -100	90 кг	Один патрон боевик 800 гр.
комбинированная из двух разнотипных ВВ (Б)	Fortis Advantage -100	80 кг	Два патрона боевика: нижний 800гр, верхний - 500гр.
	Гельпор ГП-Т	4 кг	
комбинированная из двух разнотипных ВВ, разделенных инертным профилированным промежутком (В)	Fortis Advantage -100	70 кг	Два патрона боевика: нижний - 800гр, верхний - 500гр.
	Гельпор ГП-Т	4 кг	

Оценка качества проработки подошвы выполнена с помощью маркшейдерской съемки (табл.9). Фрагментация породы может быть оценена различными способами. В данном случае, использовался метод, основанный на анализе изображений развала горной массы с помощью программного обеспечения WipFrag(рисунки 10, 11).

В результате проведенных испытаний установлено, что:

1. При применении комбинированной конструкции из разнотипных ВВ, разделенных профилированным инертным промежутком выход негабаритных кусков ($d > 1000$ мм) уменьшился на 40% по сравнению с сплошной конструкцией скважинного заряда.

2. При использовании комбинированного заряда с профилированным инертным промежутком наибольший эффект по проработке подошвы был достигнут при размещении частей комбинированного заряда в соотношении 0,3:0,7 от высоты уступа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием, которая содержит решение важной для железорудных карьеров задачи - повышения

эффективности буровзрывных работ при отработке месторождений железной руды высокими уступами за счет применения разработанной конструкции скважинного заряда для повышения качества проработки подошвы уступа в сложных горно-геологических условиях.

Основные научные выводы и практические рекомендации, полученные в ходе выполнения данных исследований и внедрения разработок, заключаются в следующем:

1. Установлены размеры зон переизмельчения, дробления и отколообразования для различных зарядов с учетом физико-технических свойств горных пород;

2. Размещение комбинированного профилированного заряда взрывчатого вещества в нижней части скважины при взрывании 20-30 метровых уступов железных руд приводит к увеличению перехода энергии заряда в энергию волны напряжений до 7%;

3. Разделение частей скважинного заряда профилированным инертным промежутком обеспечивает увеличение продолжительности динамического нагружения донной части скважины до 15 мс.

4. Разработана методика проведения промышленных испытаний для исследования влияния конструкции скважинного заряда на эффективность проработки подошвы уступа скального массива.

5. Оптимальное действие по разрушению горной породы на уровне подошвы уступа с применением комбинированной конструкции скважинного заряда, части которого разделены профилированным инертным промежутком, достигается размещением частей заряда в соотношении 0,3 - (низ):0,7 - (верх) от высоты уступа.

6. Промышленными исследованиями установлено, что при использовании скважинных зарядов с разделением частей профильным инертным промежутком за счет запираания продуктов взрыва увеличивается продолжительность воздействия квазистатического поля напряжений на массив горных пород. Это приводит к улучшению дробления, к снижению диаметра среднего

куска на 9-14% и снижению выхода негабарита в 1,4 раза;

7. Разработанные рекомендации по использованию комбинированных скважинных зарядов с профильным инертным промежутком, обеспечивающим целенаправленную фокусировку и отражение ударной волны в донную часть скважины и создание максимально длительного по времени нагружения массива на уровне подошвы уступа, внедрены на предприятии АО «Лебединский ГОК». За счет этого подошва уступа проработана качественно (отсутствуют пороги), уменьшился средний диаметр куска разрушенной горной массы от 1,18м до 0,96м, что в совокупности привело к увеличению технической производительности экскаватора ЭКГ-8И на 10%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих наиболее значимых работах:

В журналах, рекомендованных ВАК:

1. Мысин, А.В. Совершенствование буровзрывных работ на железорудном карьере Открытого Акционерного Общества «Михайловский горно-обогатительный комбинат» / А.В. Мысин, Г.П. Парамонов, Ю.А. Миронов // Журнал «Маркшейдерский Вестник», 2017. - №6. - С.19-24.

2. Парамонов, Г.П. Численное моделирование разрушения блока горной породы взрывом с учетом лабораторных экспериментов / Г.П. Парамонов, В.Н. Ковалевский, А.В. Мысин // Сб. «Взрывное дело». - М.: ИПКОН РАН, 2019. - Вып.122/79. - С. 19-33.

3. Парамонов, Г.П. Действие на массив горных пород скважинных зарядов различных конструкций / Г.П. Парамонов, В.Н. Ковалевский, А.В. Мысин // Сб. «Взрывное дело». - М.: ИПКОН РАН, 2019. - Вып.122/79. - С. 106-121.

Патенты:

4. Патент № 176467 Российская Федерация, МПК F42D 1/08 (2018.01). Комбинированный скважинный заряд: № 2017122886: заявл. 27.06.2017; опубл. 19.01.2018 / Парамонов Г.П., Миронов Ю.А., Мысин А.В.; заявитель СПГУ. - 4 с.: ил. - Текст: непосредственный.

Таблица 8 - Результаты расчета детонационного давления на стенки зарядной полости для различных конструкций зарядов

Конструкция заряда	Тип ВВ		Плотность ВВ, кг/м ³		Скорость детонации, м/с		Дет. давление, ГПа	
	А	Fortis Advantage -100		1,1-1,14		4755-5122		6,21-7,47
Б	Гельпор ГП-Т	Fortis Advantage -100	1,46	1,09-1,14	5855-6224	4796-5102	12,51-14,13	6,26-7,41
В	Гельпор ГП-Т	Fortis Advantage -100	1,46	1,1-1,14	5886-6203	4781-5124	12,64-14,04	6,28-7,48

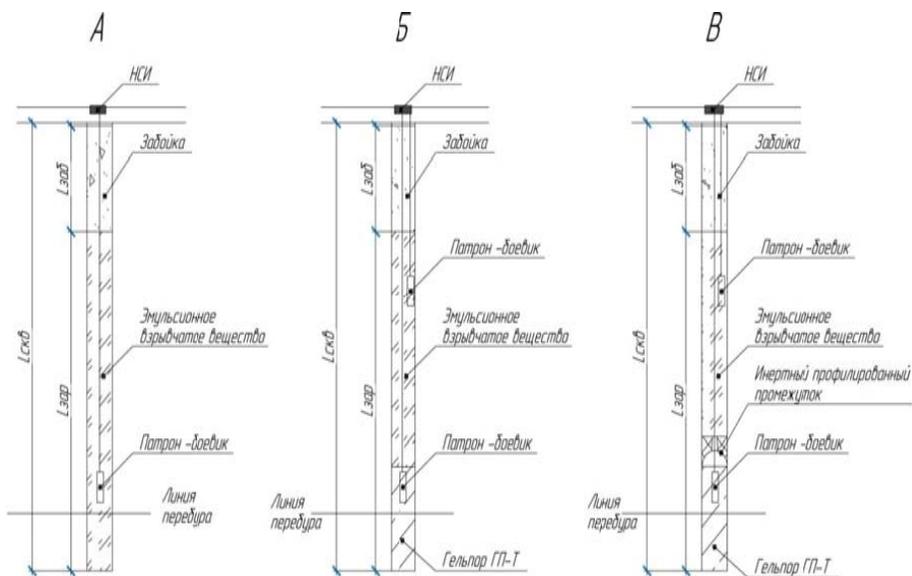


Рисунок 8 - Исследуемые конструкции скважинных зарядов

Таблица 9 - Результаты опытно-промышленных испытаний

Блок	Средняя высота уступа, м	Кол-во взрываемых скважин	Сопротивление по подошве уступа, м	Перебур, м	Используемая конструкция	%, негабарита	Превышение подошвы, м
42	15,1	14	7,0	2,0	а	11,2	+1,3
43	16,5	18	7,0	2,0	б	9,5	+0,9
44	16,4	16	7,0	2,0	в	9,1	-0,2

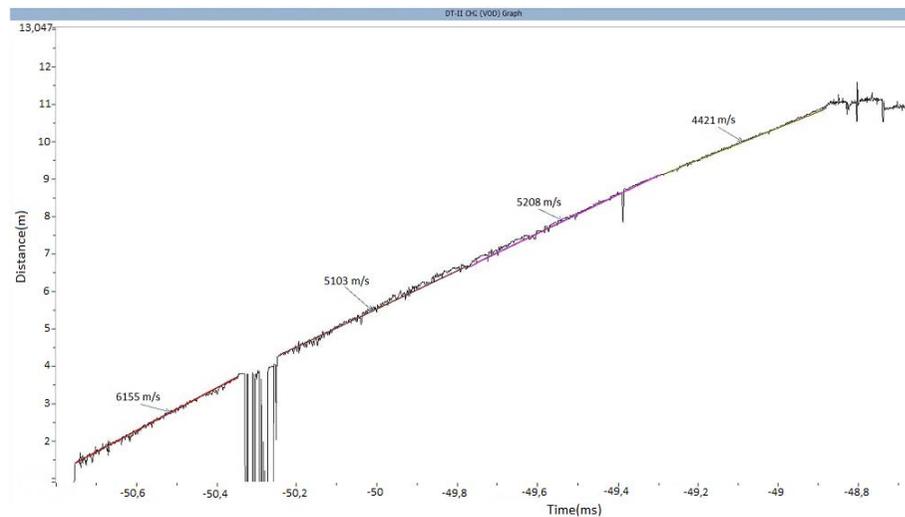


Рисунок 9 - График изменения скорости детонации по длине заряда конструкции В

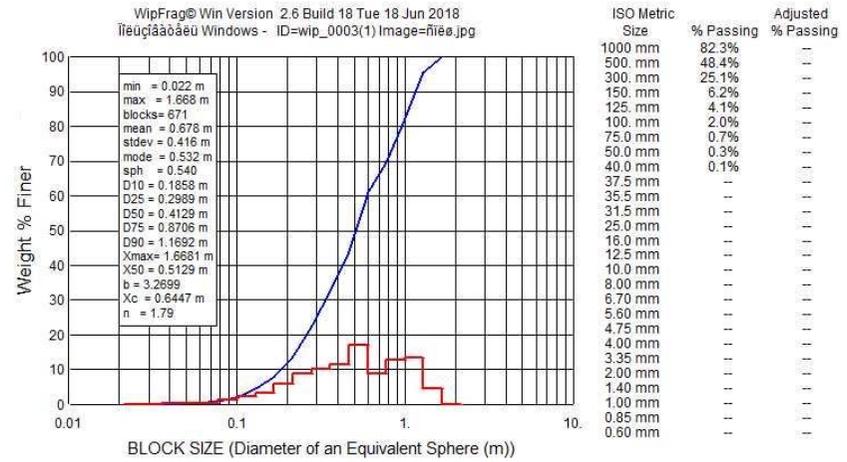


Рисунок 10 - Развал горной массы после взрыва и распределение грансостава (при применении сплошной конструкции заряда)

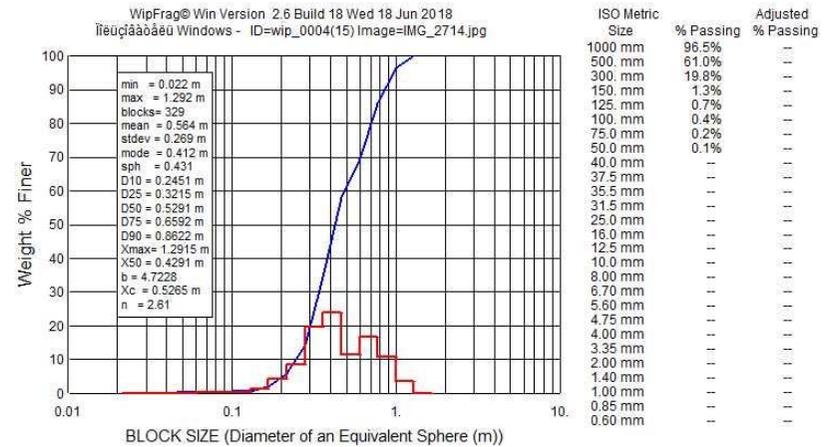


Рисунок 11 - Развал горной массы после взрыва и распределение грансостава (при применении комбинированной конструкции из разнотипных ВВ, разделенных профилированным инертным промежуток)

