

На правах рукописи

ДОКУТОВИЧ МАКСИМ ИГОРЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕТКИ
СКВАЖИН НА КАРЬЕРАХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННУЮ
СТЕПЕНЬ ВЗРЫВНОГО ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
(НА ПРИМЕРЕ ОАО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»
И ООО «КАРБОНАТ»)**

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

г. Москва – 2021 г.

Работа выполнена в Московском государственном горном университете и 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 «__» _____ 20__ 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 «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Федотенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основной задачей буровзрывных работ (БВР) на карьерах является обеспечение заданной степени дробления горных пород (г.п.). В настоящее время существуют методики только ориентировочных расчетов параметров БВР без теоретического обоснования. Поэтому после расчетов рациональные параметры БВР корректируются в результате проведения нескольких опытно-промышленных серий. Существующие методики оценки среднего размера куска породы далеки от совершенства и как правило не получили широкого применения в горном деле. В Московском государственном горном университете (МГГУ) разрабатывалась новая теория разрушения г.п. взрывом удлиненных зарядов промышленных взрывчатых веществ (ПВВ), как развитие феноменологической квазистатическо-волновой (ФКСВ) теории В.Н. Родионова о крупномасштабном подземном взрыве. Так в работах проф. Г.М. Крюкова с коллегами, впервые установлены закономерности формирования разных зон разрушения, с учетом физико-технических свойств г.п., термодинамических параметров зарядов ПВВ и параметров их размещения на взрываемом блоке. Опираясь на эти работы, стало весьма перспективным развитие теории формирования гранулометрического состава пород в развале, что позволило бы повысить достоверность теоретических оценок и существенно снизить объемы корректировочных опытно-промышленных взрывов, время и себестоимость взрывных работ (ВР). Поэтому обоснование рациональных параметров удлиненных зарядов ПВВ, обеспечивающих заданную степень взрывного дробления г.п. на карьерах, является актуальной научной задачей.

Цель работы заключается в установлении закономерностей формирования разных зон разрушения горных пород при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ для расчета рациональных параметров сетки скважин на уступе карьера.

Идея работы заключается в использовании закономерностей взрывного дробления горной породы взрывом каждого заряда промышленного взрывчатого вещества для определения параметров сетки скважин на уступе карьера.

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

- провести анализ существующих теорий и моделей процессов деформирования и разрушения горных пород взрывом зарядов ПВВ;
- исследовать существующие взрывные технологии при открытой добыче полезных ископаемых на карьерах;
- изучить закономерности формирования гранулометрического состава породы в зоне регулируемого дробления;
- разработать модель формирования гранулометрического состава при взрывах зарядов промышленных взрывчатых веществ в горных породах;

– предложить методику расчета рациональных параметров БВР обеспечивающая заданную степень взрывного дробления г.п.

Новизна работы заключается в установлении закономерностей формирования взрывного дробления горных пород 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: анализ и обобщение результатов исследований, выполненных ранее по взрывному дроблению г.п., разработка теории дробления г.п. в ближней к заряду зоне, экспериментальные исследования взрывного дробления пород в лабораторных и промышленных условиях, статистическая обработка опытных данных.

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 раздавливание.

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

3. Установление обобщающей взаимосвязи между средним и максимальным размерами кусков в зоне регулируемого дробления пород при взрывах зарядов ПВВ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

– удовлетворительным согласованием теоретических оценок степени дробления г.п. 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 ВР;

– положительными результатами внедрения рекомендаций по рациональным параметрам БВР при ведении ВР на карьерах Костомукшского и Мончаловского месторождений;

– положительными результатами внедрения 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 г.п. 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 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, СПбГТИ, 2006 г.), на Международных научных симпозиумах “Неделя горняка” (г. Москва, МГУ, 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

Внедрение в горное производство компьютерной техники значительно повысило скорость и эффективность оценок технико-экономических показателей (ТЭП) горных работ, в том числе и БВР. Вместе с тем, положительные результаты применения компьютеров существенно повысили требования

к достоверности соотношений и зависимостей, используемых в расчетах с использованием сложных аналитических зависимостей и больших массивов табличных данных. При этом заранее предполагается, что эти параметры БВР, являются ориентировочными и обязательно должны быть скорректированы по результатам проведения опытно-промышленных взрывов в конкретных горно-геологических условиях того или иного карьера. Это обстоятельство приводит к существенному замедлению прогнозирования результатов ВР и планирования параметров последующих горных работ: вторичного дробления, экскавации, транспортировки, т.е. имеет место существенное отставание прикладной теории разрушения г.п. взрывом зарядов ПВВ от современного уровня и возможностей компьютерной техники, широко внедряемой в горную промышленность.

Одним из главных параметров при оценке результатов взрывного дробления г.п. в горном деле и строительстве является оценка среднего размера куска в развале. Знание зависимости этой величины от параметров БВР и свойств г.п. позволяет надёжно рассчитывать не только ТЭП БВР на предприятиях, но и решать ряд других важных задач горного производства – проектирование и выбор горного оборудования на карьерах и обогатительных фабриках, ТЭП горных работ и обогатительного оборудования и т.д.

В существующих методиках оценки гранулометрического состава, среднего размера куска породы, выхода негабарита и т.д. недостаточно учитывается физическая сущность разных процессов разрушения пород на разных расстояниях от взрывающегося заряда ПВВ. Таким образом, зависимость d_{cp} от параметров БВР и свойств пород определяются по эмпирическим закономерностям на основе опыта, а на действующем предприятии его рациональные значения – путём проведения промышленных взрывов.

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 г.п. 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.

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.

В диссертации на основе развития «Феноменологической квазистатическо-волновой теории В.Н. Родионова о крупномасштабном подземном взрыве» дается теоретические оценки детерминированных закономерностей дробления г.п. в зоне регулируемого дробления и среднего размера куска в

развале с учетом физико-технических свойств г.п., термодинамических параметров зарядов ПВВ и параметров их размещения на взрываемом блоке и устанавливается величина степени дробления пород на разных расстояниях от оси взорванного заряда с использованием закономерностей формирования НДС в породе при взрывах в ней зарядов ПВВ и развития теории трещин на рассматриваемый процесс с учетом распределения микронарушенности в породе, что подтверждается положительными результатами лабораторных и промышленных исследований взрывного дробления принципиально разных пород.

При оценке эффективности взрывного дробления г.п. основными критериями, определяющими эффективность ведения взрывных и последующих горных работ, являются: *выход негабарита, степень дробления г.п., 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 г.п.

• Выход негабарита

Установлено, что b_0 - радиус зоны регулируемого дробления г.п. при взрыве удлиненного заряда ПВВ равен:

$$b_0 = a_0 \cdot \sqrt{P_{ж} / \kappa_3 \sigma_{рас}}, \text{ м}, \quad (1)$$

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:

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

где Δ_B - плотность заряжения ПВВ, кг/м³; D - скорость детонации, м/с.

Учитывая (1) и (2), а a - расстояние между зарядами в ряду и b - расстояние между рядами зарядов удовлетворяют соотношениям:

$$a \geq 2b_0 \quad \text{и} \quad b \geq 2b_0, \quad (3)$$

то выход негабарита определяется соотношением: $V_H^+ = V_e^+ \cdot (1 - \bar{q})$, %, (4)

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

$$\bar{q} = d_{зп}^2 \Delta D^2 \left[(\gamma + 1) a b \sigma_{рас} \right]^{-1}. \quad \bar{q} = \frac{d_{зп}^2 \cdot \Delta_{BB} \cdot D^2}{(\gamma + 1) \cdot a \cdot b \cdot \sigma_{рас}}, \quad (5)$$

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 нер-

гулируемого дробления равна $v_{нд} = (ab - 4b_0^2)l_{сп}$. При условиях (3) параметр

$$\bar{q} \leq 1. \text{ Если же принять: } a \leq 2b_0 \quad \text{и} \quad b \leq 2b_0, \quad (6)$$

то $\bar{q} \geq 1$ и выхода негабарита не будет, при исключении отрицательного взаимного влияния взрыва соседних зарядов на процесс разрушения ими породы. Соотношения (4) и (5) 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 (1) - (6) впервые позволяют надежно прогнозировать значения первого главного критерия взрывного дробления г.п. – выход негабарита.

• Средний размер куска в развале

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

$$d_{cp} = l_{cp} \cdot [1 - \bar{q}(1 - \bar{d}_{cp,1})], \text{ м}, \quad (7)$$

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 г.п. 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 г.п. – среднего размера кусков в развале, необходимо установить зависимость степени разрушения г.п. в зоне регулируемого дробления от свойств последних, типа ПВВ, 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 г.п. в зоне регулируемого дробления.

В настоящей работе излагается новый теоретический подход к описанию процесса разрушения г.п. в зоне регулируемого дробления при взрывах зарядов ПВВ, подтвержденный результатами лабораторных и промышленных исследований взрывного дробления.

• Элементы теории разрушения г.п. взрывом зарядов ПВВ

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:

$$l_{кск} \sim N_{тр}^{-1}, \quad (8)$$

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:

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{дф}}, \quad (9)$$

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

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

$$N_{\text{дф}} \sim l_{\text{дф}}^{-\alpha}, \quad \Rightarrow \quad l_{\text{кск}} \sim l_{\text{дф}}^{\alpha}, \quad (10)$$

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

Из теории трещин известно, что:

$$\sigma_{\text{кр}} = k_c / (l_{\text{дф}})^{0.5}, \quad \text{Па}, \quad (11)$$

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:

$$l_{\text{кск}} \sim \sigma^{-2\alpha}. \quad (12)$$

Установлено, что квазистатические напряжения, определяющие процессы разрушения г.п. в зоне регулируемого дробления, убывают с удалением от удлинённого заряда по законам:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = P_{\text{ж}} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2; \quad \sigma_{rr} = -P_{\text{ж}} \left(\frac{a_0}{r} \right)^2; \quad (13)$$

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

Объединяя (12) и (13), устанавливается закон изменения размеров кусков породы в зоне регулируемого дробления:

$$l_{\text{кск}} = l_{\text{он}} \cdot \left(\frac{r}{r_{\text{он}}} \right)^{4\alpha}, \quad (14)$$

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

$$d_{\text{ср}} = \frac{l_{\text{он}}}{2\alpha + 1} \cdot \left(\frac{r_{\text{оп}}}{r_{\text{он}}} \right)^{4\alpha}; \quad d_{\text{ср}} = l_{\text{кск}}^{\text{max}} / (2\alpha + 1), \quad (15)$$

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

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

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt{P_{жс} / \sigma_{мд}}, \text{ М,} \quad (16)$$

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

$$\sigma_{мд} = 10 \cdot \sigma_{сжс}. \quad (17)$$

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

$$b_\tau = a_0 \cdot \sqrt{P_{жс} / 2\tau_{сдв}}, \text{ М,} \quad (18)$$

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

Аналогичные соотношения при взрыве сосредоточенного заряда имеют вид:

$$\sigma_{rr} = -P_{жс} \left(\frac{a_0}{r} \right)^3; \quad \sigma_{\alpha\alpha} = \sigma_{\beta\beta} = -0,5\sigma_{rr}; \quad (19)$$

$$l_{кск} = l_{он} \cdot \left(\frac{r}{r_{он}} \right)^{6\alpha}; \quad (20)$$

$$d_{ср} = \frac{l_{он}}{2\alpha + 1} \cdot \left(\frac{r_{оп}}{r_{он}} \right)^{6\alpha}; \quad d_{ср} = l_{кск}^{max} / (2\alpha + 1); \quad (21)$$

$$b_* = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / \sigma_{мд}}; \quad b_0 = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / \sigma_{рас}}; \quad b_\tau = a_0 \cdot \sqrt[3]{P_{жс} / 2\tau_{сдв}}. \quad (22)$$

Соотношениями (14) – (16) и (18) – (22), опираясь на ФКСВ модель воздействия взрыва зарядов ПВВ 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.

• Лабораторные исследования взрывного дробления силикатных блоков

В качестве 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 $0,25 \leq d_{част} \leq 0,5$ мм, который надежно инициируются в шпурах диаметром $d_{шп} \geq 1$ 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. Инициирование зарядов ПС осуществлялось путем взрыва импульсом тока тонкой нихромовой проволоочкой. Опыты проводились в стальной металлической камере с плотно закрывающейся крышкой, с внутренними размерами $300 \times 300 \times 200$ мм, при толщине стенок камеры равной 10 мм (рис. 1. а). Разрушению подвергались си-

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

ликатные блоки размером $120 \times 120 \times 64$ мм и $60 \times 60 \times 64$ мм с плотностью $\rho_{\text{пор}} = 2,1 \text{ г/см}^3$.

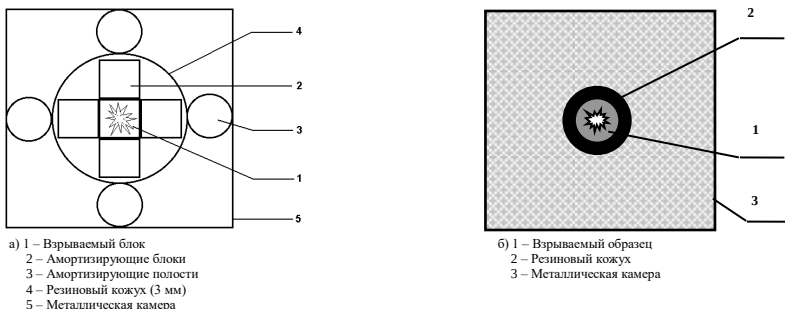


Рисунок 1 – Схема размещения взрываемых образцов в камере.

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 $0,25 \leq d_{\text{пк}} \leq 0,5$ мм. При анализе опытных данных объём песка исключался из объёма соответствующих фракций. Всего проведено 19 серий опытов.

• Результаты анализа взрывного дробления силикатных блоков

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

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

где $V_1 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{ор}}^3$ – объём раздробленной горной массы, приходящий на верней и нижний части заряда; $V_2 = \pi \cdot l_{\text{зар}} \cdot r_{\text{ор}}^2$ – объём раздробленной горной массы, приходящий на всю длину заряда; $V_3 = -\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{\text{ш}}^2 \cdot r_{\text{ор}}$ – объём зарядной полости в верхней части действия заряда, который не участвует в формирование гранулометрического состава; $V_4 = -\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{\text{ш}}^2 \cdot l_{\text{зар}}$ – объём зарядной полости по всей длине

действия заряда, который не участвует в формирование 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.

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 получа-

ются 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.

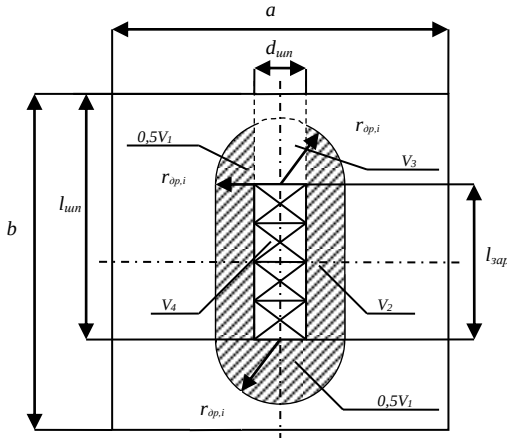


Рисунок 2 – Схема формирования зон разрушения.

Последовательность расчета при анализе опытных данных

1. Объемы 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:
$$V_{op,k}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^k V_{op,i}^{(i)}; \quad 1 \leq k. \quad (25)$$

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:
$$\bar{d}_{cp,\Sigma} = \frac{d_{\Sigma,k}^{cp}}{l_{\max}^{cp}}. \quad (27)$$

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

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. Нормированные значения максимального размера кусков:

$$\bar{l}_{\lambda, \kappa}^{\max} = \frac{l_{\lambda, \kappa}^{\max}}{l_{on, \lambda}^{\max}}. \quad (32)$$

Для каждого процесса разрушения породы необходимо принимать свои опорные значения. В зоне мелкодисперсного дробления в качестве опорного значения принимается $l_{on,1,\lambda}^{\max} = 1$ мм, а в зоне интенсивного трещинообразования $l_{on,2,\lambda}^{\max} = 5$ мм.

9. Опорные значения зон разрушения с внешними радиусами:

а) $r_{dp,2} = r_{on,1}$; б) $r_{dp,5} = r_{on,2}$; (33)

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

10. Рассчитывалось:

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

11. Теоретическое распределение кусков в зоне регулируемого дробления:

11.1. Взрыв удлинённого заряда:

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

11.2. Взрыв сосредоточенного заряда:

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

12. Рассчитывалось отношение:

$$\bar{l}_{\lambda, \kappa}^{\max} = \frac{\bar{l}_{\lambda, \kappa}^{\max}}{\bar{l}_{\lambda, \kappa}^{\max}}. \quad (37)$$

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

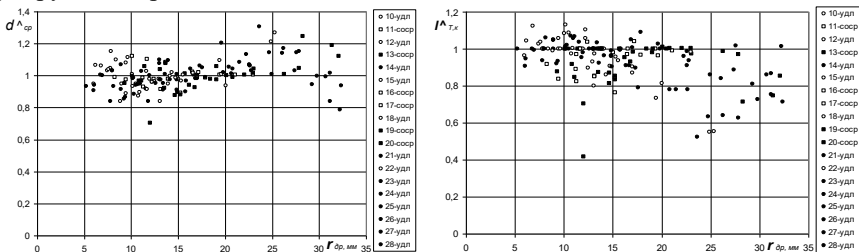


Рисунок 3 – Зависимости относительных величин среднего и максимального размеров кусков породы с удалением от оси заряда.

• **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 размера-

ми 71×(67...84) мм и 69×(68...73) мм при средней плотности $\rho_{пор} = 2,4 \text{ г/см}^3$ 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.

• **Результаты анализа взрывного дробления образцов из полигалитовой породы.** При анализе результатов опытов с образцами из полигалитовой породы использовалась та же модель, что и выше. В этом случае опорное значение в зоне мелкодисперсного дробления принималось $l_{оп,3,1}^{max} = 0,5 \text{ мм}$, а в зоне трещинообразования $l_{оп,3,2}^{max} = 5 \text{ мм}$. 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.

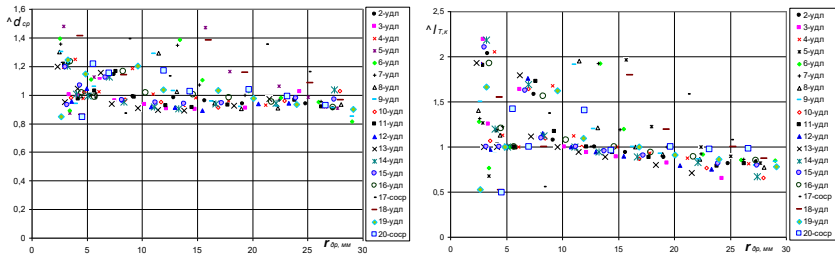


Рисунок 4 – Зависимости относительных величин среднего и максимального размеров кусков раздробленной породы с удалением от оси заряда.

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 ПВВ по взрывному дроблению негабаритов известняка на карьере «Жуково» ООО «Карбонат» приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры ВР по дроблению негабаритов известняка

Показатели	№ негабарита (опыта)					
	7	8	9	10	11	12
Объем негабарита, м³ (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
Удельный расход ВВ, кг/м³	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/м³	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 свидетельствуют о том, что в этом случае имело место два разных процесса:

1) Интенсивное разрушение на куски размером до 50 мм в зоне прилегающей 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 ПВВ.

В диссертации анализируется процесс интенсивного бризантного дробления негабаритов известняка, взрывом зарядов ПВВ. 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 $i_{оп1}^{max} = 0,5$ мм, а в зоне интенсивного трещинообразования $i_{оп2}^{max} = 5$ мм;

– опорные значения радиусов зон разрушения: а) $r_{оп1} = r_{др2}$; 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. 7 и 8. При анализе опытных данных были использованы приведенные выше соотношения (22), (30)–(31), (36)–(37), которыми описываются две модели разрушения породы взрывом зарядов ПВВ. Соотношением (22) 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 $i_{тk}^{max} = 1$ и $\hat{d}_{ср}^o = 1$ (рис. 5), подтверждая тем самым достоверность предложенных соотношений по оценки степени трещинообразования – формирования кусков и объемов соответствующих разрушений.

При этом отличия опытных данных от теоретических не превышает 20%. Наибольшие отличия опытных значений от теоретических $\hat{i}_{тk}^{max} = 1$ и $\hat{d}_{ср}^o = 1$ имеют место только при интенсивном мелкодисперсном дроблении с размером частиц до 3 мм.

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
$d_k^{\text{cp}}, \text{мм}$	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
$d_{\Sigma k}^{\text{cp}}, \text{мм}$	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
$\bar{d}_{\text{cp}\Sigma}$	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
$r_{\text{др}}, \text{мм}$	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
$\bar{l}_{\gamma k}^{\max}$	0,5	1	0,2	0,4	0,6	1	1,4	2	3	4	6	8	10	100
$\bar{r}_{\text{др}}, \text{мм}$	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
$\bar{l}_{\tau k}^{\max}$	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

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 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 (22) и (30). То есть предложенные указанными выше соотношениям описание процесса трещинообразования и формирования соответствующих объемов надежно описывают процесс разрушения г.п. $d_{\text{част}} > 3$ 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 (22), (30) будет обусловленная в основном вариацией опытных данных при определении объемов более крупных фракций. Таким образом, экспериментальные исследования, выполненные в натурных 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.

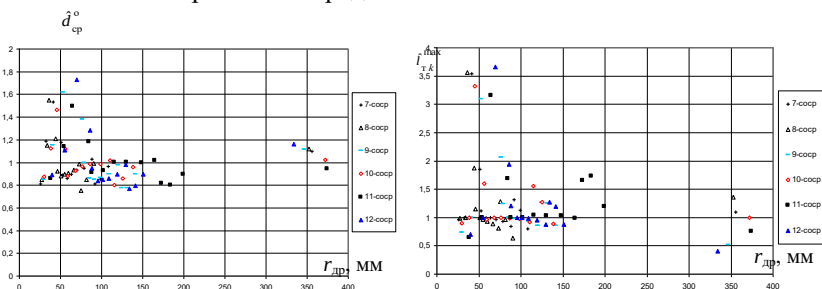


Рисунок 5 – Зависимости относительных величин среднего и максимального размеров кусков породы с удалением от оси заряда.

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.

• Опытнo-промышленные исследования взрывного дробления известняка.

Условия проведения опытнo-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 (пнеумоударного бурения) СБУ-100.

Предлагаемые параметры размещения скважин на уступе рассчитаны по (1) и (6) в виде: $a = b = a_0 \sqrt{P_{\text{ж}} / \kappa_3 \sigma_{\text{рас}}} = 2,4 \text{ м}$.

В этом случаи 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 ВР при серийных и опытнo-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 случаи при взрыве удлиненного заряда формируется зона регулируемого дробления $v_{\text{рд}} = 2,4^2 l_{\text{зр}} = 5,76 l_{\text{зр}}$. Общий же объем разрушения приходящийся на взрыв одного заряда $v_{\text{зр}} = 3,5^2 l_{\text{зр}} = 12,25 l_{\text{зр}}$. Таким образом, объем зоны нерегулируемого дробления будет равен $v_{\text{нд}} = 6,49 l_{\text{зр}}$. Следовательно, выход негабарита при серийном взрывании будет равен $v_{\text{н}}^+ = \frac{v_{\text{нд}}}{v_{\text{зр}}} \cdot v_{\text{с}}^+ = \frac{6,49}{12,25} \cdot 20 = 10,6\%$, где $v_{\text{с}}^+ = 20\%$ –

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-промышленного взрыва (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 $d_{cp}=0,17$ м.

Таблица 3 – 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 заряжания	кг/м ³	0,75	0,75
12.	выход негабарита	%	10	<1
13.	средний размер кусков в развале	м	0,24	0,17

Проведенный опытно-промышленный взрыв дробления известняка на карьере «Жуково» подтвердил основные положения разработанной теории дробления г.п. взрывом скважинных зарядов ПВВ на уступах карьеров.



Рисунок 6 – Опытно-промышленное взрывное дробление известняка.

По предложенным параметрам БВР имело место безнегабаритное взрывное дробление известняка с существенным снижением (на 30%) средне-

* 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.

го 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 г.п. при их взрывном дроблении на карьерах – установление закономерностей разрушения взрывом удлинённых зарядов ПВВ г.п. 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: $b_z = a_0 \cdot \sqrt{P_{жк} / \sigma_{жк}}$ 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 взрывающего уступа необходимо, чтобы расстояния между зарядами a было равно $2b_0$, а расстояние между рядами зарядов $b = 2b_0$ при исключении взаимного влияния одновременно взрывающихся зарядов на процесс разрушения ими породы.

3. Установлены обобщающие закономерности формирования гранулометрического состава в развале при взрывном дроблении г.п. 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 ВВ.

5. Разработана модель процесса разрушения в зоне радиального трещинообразования соответствующий, по которой внешний радиус зоны дезинтегрирования клиновидных секторов имеет место при значениях радиальных сжимающих напряжений.

6. Опираясь на ФКСВ теорию 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 г.п.

7. Разработана методика расчета рациональных параметров конструкций зарядов ПВВ и сетки скважин для взрывного дробления г.п. 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_{on} и r_{on} характеризующих особенности строения пород.

9. При опытно-промышленном взрывании на Мончаловском месторождении известняков на карьере «Жуково» и на карьерах ОАО «Карельский окатыш» получено удовлетворительное согласованность результатов с теоретическими оценками.

10. 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»» принятые к использованию на карьерах ОАО «Карельский окатыш», которые позволили скорректировать параметры БВР при промышленном ведении ВР на Костомукшском месторождении железистых кварцитов и дали положительные результаты по снижению среднего размера куска в развале;

- «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»», которые 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;

- «Руководство по выполнению практических занятий по дисциплине: «Математические методы моделирования и расчеты на ЭВМ»», которые были использованы в 2006-2008 гг. при проведении практических занятий со студентами горных специальностей;

- «Руководство по выполнению лабораторно-практических занятий по дисциплине: «Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании»», которые 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», которые 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 моди-

фикации 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. // ГИАБ, №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 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 изданиях, с указанием личного вклада автора:

10. 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.

В других изданиях:

11. 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.

12. **Докutowич М.И.** Теоретическое обоснование регулирования granulometricheskogo 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.

13. Айнбиндер И.И., Жариков И.Ф., **Докutowич 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.

14. **Докutowич 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.