

На правах рукописи



Плотников Андрей Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВНОГО РЫХЛЕНИЯ
СКАЛЬНЫХ ПОРОД С МИНИМАЛЬНЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ
ГОРНОЙ МАССЫ**

Специальность 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет» (ТОГУ)

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор **Шевкун Евгений Борисович**

Официальные оппоненты: **Закалинский Владимир Матвеевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем комплексного освоения недр» им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук.
Хохлов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Взрывного дела» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН).

Защита диссертации состоится 01 марта 2023 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.478.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел./факс: +7(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте www.khfrsc.ru

Автореферат разослан « _____ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



С.И. Корнеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. основополагающее место в общем развитии технократической цивилизации занимает минерально-сырьевой комплекс, поскольку получение полезных ископаемых является безальтернативной необходимостью для самого факта существования человечества. Потребление минерально-сырьевых ресурсов за последнее столетие возросло с 7 до 280 млрд. т в год (в 40 раз), а с учетом сопутствующих пород – с 8 до 609 млрд. т. По прогнозу оно увеличится к 2050 г. до 1400 млрд. т полезных ископаемых (в 5 раз). При этом неизменно возрастает труднодоступность освоения источников минерально-сырьевых ресурсов, что ведет к увеличению расходов на освоение месторождений. Горная промышленность остается одной из наиболее трудоемких (на горнопромышленный комплекс приходится около 40% фондов всех промышленных предприятий России, сосредоточено 13% балансовой стоимости основных фондов экономики). Полнота извлечения запасов полезных ископаемых из недр остается в целом недостаточной, о чем свидетельствуют потери, достигающие по отраслям горной промышленности от 2–5 до 50%. Поэтому проблема рационального (эффективного и вместе с тем бережливого) освоения запасов минерально-сырьевой базы существует и в будущем обострится.

Кроме количественных потерь при добыче часто происходят качественные потери – снижение качества добытого полезного ископаемого как следствие примешивания к нему вмещающих пород (разубоживания). Ущерб выражается: в непроизводительных затратах на транспортирование примешанной породы и переработку её на обогатительной фабрике; в увеличении потерь полезного компонента при переработке разубоженной руды; в снижении производственной мощности перерабатывающих руду предприятий по конечной продукции (концентрату, металлу) и нередко – в ухудшении качества этой продукции. В итоге качественные потери при добыче приводят к недополучению предприятием прибыли, часто в очень больших размерах.

В современной практике разработки месторождений полезных ископаемых горно-технологическое разубоживание определяется, как правило, сопоставлением содержания полезного компонента в погашенных балансовых запасах и в добытой рудной массе, а конструктивное разубоживание, главным образом, морфологическим строением залежей полезных ископаемых, применяемой системой разработки и параметрами отбойки руды. Необходимость учета конструктивного разубоживания наряду с горно-технологическим подтверждается тем обстоятельством, что рудные залежи содержат в контурах до 35 % и более породных и некондиционных включений. При этом валовая выемка подобных залежей сопровождается высоким (до 30 %) конструктивным разубоживанием. Ухудшение качества полезного компонента в скальных породах формируется как на стадии подготовки руды к выемке – при смещении и перемешивании горной массы в процессе взрывного рыхления, так и на стадии выемки горной массы, когда сложно отделить руды от пустых пород. Поэтому самым эффективным путем снижения разубоживания является

взрывное рыхление горных пород с минимальным смещением руды с пустой породой в развале раздробленной горной массы.

В основу диссертационной работы положены результаты, полученные при непосредственном участии автора в 2013 – 2021 гг. в процессе промышленного освоения золоторудных месторождений ГК ПЕТРОПАВЛОВСК.

Цель диссертационной работы – выбор и обоснование способов взрывного рыхления, позволяющих минимизировать примешивание пустых пород к рудной массе.

Идея работы заключается в том, что увеличение интервалов замедления в системе многорядного короткозамедленного взрывания (МКЗВ) в сочетании с взрыванием в «жестком» зажиме уменьшает смещение горных пород в процессе развития взрыва, способствуя максимальному пространственному сохранению первичных контактов руд и пустых пород в развале горной массы при одновременном улучшении качества дробления.

Объект исследования – система МКЗВ при различных интервалах замедления.

Предмет исследования – схемы взрывания и их влияние на параметры развала взорванной горной массы.

Для реализации идеи и достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнить анализ патентных и литературных материалов по проблеме снижения перемешивания горной массы при взрывном рыхлении скальных пород;
- разработать и испытать схемы взрывания с увеличенными интервалами замедления по схеме «один заряд – одна ступень замедления»;
- разработать технические решения по минимизации смещения пород в развале горной массы после взрыва;
- провести опытно-промышленную проверку эффективности предложенных технических решений по обеспечению минимального разубоживания ценных руд.

Методы исследования. Использован комплекс методов исследования: научный анализ и обобщение литературных, патентных материалов и производственных данных по технологиям взрывного рыхления пород с минимальным смещением развала горной массы; моделирование процесса развития взрыва во времени и пространстве; опытно-промышленные испытания новых технических решений с применением видеосъемки массовых взрывов; технико-экономическая оценка результатов испытаний.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Многорядное короткозамедленное взрывание является этапным процессом, разделенным во времени: трещина в породе прорастает с постоянной скоростью только на этапе растяжения в волне напряжения и только на величину разности напряжений в волне и окружающем массиве. Поэтому необходимо обеспечить время на спад напряжения в массиве от предшествующего взрыва скважинного заряда увеличением интервала между ступенями замедления в схеме взрывания «один заряд – одна ступень замедления». Необходимое качество дробления горных

пород и параметры развала горной массы целесообразно достигать взаимодействием волн напряжения в зоне предразрушения при увеличенных интервалах замедления.

2. Схемы взрывания со стартом в тыльной части блока и фактическими замедлениями между взрывами отдельных скважинных зарядов более 100 мс позволяют увеличить КПД взрыва суммированием эффектов от взаимодействия волн напряжения в зоне предразрушения с отражением части энергии волн напряжения от ранее взорванной породы, увеличивающей долю энергии взрыва в разрушаемом объеме пород. Это позволяет минимизировать смещение развала горной массы с сохранением первичных контактов «руда–порода» в развале горной массы, который остаётся в контурах блока.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций обеспечивается использованием современных методик теоретических и экспериментальных исследований, большим объемом экспериментальных исследований на массовых взрывах с видеосъемкой, достаточным совпадением модельных и экспериментальных данных, внедрением результатов работы на предприятии, апробацией результатов на международных конференциях, симпозиумах, признанием новизны и защитой приоритета работ патентами Российской Федерации.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

- впервые предложены схемы управления развитием массового взрыва, базирующиеся на процессах, происходящих в зоне предразрушения при развитии массового взрыва;

- доказано положительное влияние интервалов замедления, увеличенных до 100 и более мс, на качество взрывного дробления и параметры развала взорванной горной массы созданием экранирующей поверхности, отражающей часть энергии волны напряжения в разрушаемый объем массива пород;

- соотношение интервалов замедления во врубовых и отбойных рядах, кратное двум, увеличивает долю волны напряжения, преломленной в горную массу от взрыва предшествующих зарядов. Активизируется дробление породы во врубовом ряду, возникает защитный экран для откоса вышележащего уступа, способствующий созданию крутых устойчивых откосов бортов карьера.

Личный вклад автора включает в себя:

- разработку технологии взрывного рыхления горных пород с увеличенными интервалами замедления, апробацию и внедрение ее на ряде горных предприятий Дальнего Востока;

- определение цели и задач, организацию, проведение и обработку результатов экспериментальных массовых взрывов;

- разработку технических решений по оценке величины смещения первичных контуров «руда-порода»;

- разработку способа отработки участков локального оруденения;

- разработку способа повышения взрывной нагрузки на рудные участки встречными врубами по краям блока.

Практическая ценность результатов работы заключается во внедрении схемы взрывания с замедлениями 400х200 мс и врубовым рядом в тыльной части блока, что позволило снизить удельный расход ВВ на 20 %; величина смещения контактов «руда-пустая порода» во взорванной горной массе уменьшена до 0,8–1,3 м, обеспечено взрывание без развала горной массы – она не выходит за пределы взрываемого блока.

Реализация результатов работы. Рекомендации, представленные в диссертации, использованы при совершенствовании параметров взрывных работ на предприятиях ГК ПЕТРОПАВЛОВСК, где ООО «АВТ-Амур» проводит взрывное рыхление скальных горных пород. По итогам 2020 г. на одном из рудников получено снижение потерь полезного ископаемого на 22 % за счет снижения разубоживания на 1,2 % (в сравнении с интервалами замедления 150х200 мс).

Апробация результатов работы. Результаты исследований докладывались и получили одобрение на Международных симпозиумах «Неделя горняка – 2015», «Неделя горняка – 2017» (г. Москва), III Международной научно-практической конференции «Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития», 2020 г (г. Петрозаводск), VIII Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения Георесурсов» (ПХДГ-2020), VI Всероссийской научно-практической конференции «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» в г. Якутске 2021 г.; Международных научных конференциях «Far East Con» 2020 и 2021 г (г. Владивосток).

Публикации. Автор имеет 21 опубликованную работу. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 19 печатных работах, в том числе в 7 статьях, индексируемых рецензируемых базами Web of Science и Scopus, 4 статьях, опубликованных изданиями, включенным в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 4 статьях в прочих изданиях и 4 патентах РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, 4 раздела основного текста, заключение, библиографические ссылки из 140 наименований, содержит 167 страниц машинописного текста, 12 таблиц, 102 рисунка и приложение.

Автор выражает глубокую благодарность за ценные советы и научно-методическую помощь в процессе работы над диссертацией научному руководителю д-ру техн. наук проф. Шевкуну Е. Б. и д-ру техн. наук Лещинскому А. В. а также искреннюю признательность руководителям и специалистам ООО «АВТ-Амур» за содействие и помощь в проведении промышленных экспериментальных взрывов и использование результатов исследований в практике работ по взрывной подготовке горных пород к селективной выемке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится анализ современного состояния проблемы подготовки горных пород к выемке на рудных карьерах, причем основной акцент сделан на состояние проблемы потерь и разубоживания ценных руд.

Выполненный анализ современного состояния и проблем подготовки горных пород к выемке на рудных карьерах показал следующее. В силу ряда технологических (взрывное рыхление рудосодержащих пород с перемешиванием в развале) и экономических (колебания цен на конечный продукт) причин разработка месторождений сопровождается потерями полезного ископаемого, вследствие чего расход запасов недр превышает потребление, причем во многих случаях – весьма существенно. В то же время новые источники сырья становятся все более труднодоступными. Разработка месторождений требует привлечения значительных трудовых, материально-технических, энергетических и других видов ресурсов, расход которых также имеет тенденцию к росту. Поэтому необходимо бережно расходовать ресурсы недр. Для России решение задач рационального недропользования имеет исключительное значение в виду того, что использование минерально-сырьевой базы ведется в особо крупных масштабах, а горнопромышленный комплекс по существу является базовой отраслью для поддержания и развития экономики страны.

Извлечение полезного компонента при обогащении существенно изменяется при снижении его содержания в руде, поступающей на фабрику за счет увеличения разубоживания при добыче. Опыт работы обогатительных фабрик мира показал, что снижение содержания полезного компонента в руде на 0,5 % уменьшает извлечение металла в концентрат на 2–10%. На всех предприятиях, занимающихся производством золота и меди, четко прослеживается зависимость извлечения металла от содержания его в поставляемой руде.

Еще одним негативным последствием разубоживания является необходимость постоянного увеличения площадей, занимаемых под отходы горного производства – хвостохранилища. Возрастает техногенная нагрузка на район действия горно-перерабатывающих предприятий, что неизбежно ведет к росту платежей за экологию, а значит и существенному увеличению себестоимости и, следовательно, снижению налоговых платежей.

Применение взрывного рыхления горных пород при значительных удельных расходах ВВ на карьерах, разрабатывающих рудные месторождения, влечёт за собой проблему оценки качества полезного ископаемого в образованном после взрыва развале горной массы. Установленное по данным опробования буровзрывных скважин распределение в целике ценной руды, регламентирующее качество, при сложном строении рудных тел не представляется возможным с высокой степенью достоверности распространить на развал разрушенных взрывом пород. Следствием этого являются потери и разубоживание полезного ископаемого, погрешности оперативного планирования добычи руд и их внутрикарьерного усреднения.

Понимание механизма формирования потерь полезного ископаемого за счет разубоживания рудной массы пустой породой невозможно без изучения всех факторов, влияющих на этот процесс. На сегодняшний день в науке имеется внушительный объем результатов теоретических и практических исследований факторов и причин формирования разубоживания рудной массы, прежде всего в процессе взрывного рыхления скальных горных пород на открытых горных работах. Значительный вклад в исследование этих вопросов внесли российские ученые В.В. Адушкин, В.Ж. Аренс, Е.Г. Баранов, С.А. Батугин, С.Д. Викторов, С.А. Горин, Г.Г. Каркашадзе, А.Н. Кочанов, Г.М. Крюков, М.В. Курленя, Г.Г. Ломоносов, Н.Н. Мельников, В.Н. Мосинец, В.И. Одинцев, В.И. Ревнивцев, М.А. Садовский, Г.В. Секисов, И.А. Тангаев, С.М. Ткач, К.Н. Трубецкой, В.Н. Тюпин, Э.А. Хопунов, Ю.А. Чернегов, и другие, а также иностранные исследователи М.А. Кук, Liu T., Cao P., Lin H. и целый ряд других исследователей.

Экспериментальными исследованиями В.Н. Мосинца в прошлом веке было установлено, что взрывание с сохранением геологической структуры рудных тел позволяет снизить удельный расход ВВ на 20 – 25 %; коэффициент разрыхления на 20 – 25 %; себестоимость БВР на 15 – 25%; потери полезных ископаемых в среднем на 20 %; разубоживание полезных ископаемых на 30 %; повысить выход взорванной рудной массы с 1 м скважины на 10 – 12 %. Особенно эффективен этот метод управления энергией взрыва в том случае, когда взрываемый уступ в 2 – 3 раза превышает по высоте разрабатываемый уступ. Благодаря низкому коэффициенту разрыхления работа экскаваторов, располагаемых на взорванной горной массе, в этих условиях не осложняется потерей устойчивости горных пород, что позволяет осуществлять горизонтальную и вертикальную селективную выемку рудных тел, сохранивших геологическую структуру, с высокой производительностью. Однако возможности реализации таких технологий были ограничены несовершенством средств взрывания. Появление новых, неэлектрических и электронных средств взрывания существенно расширяющих возможности взрывной подготовки горных пород к выемке с минимальным перемешиванием в развале горной массы определило цель и задачи настоящих исследований.

Во второй главе изложена методика проведения исследований. Выполнение исследований по минимизации смещения взорванной горной массы подразумевает именно фактическое измерение этого параметра, а не моделирование процесса. На практике применяются способы оценки смещения взорванной горной массы с помощью маяков, установленных в пробуренные на взрывном блоке специальные скважины, и последующего отслеживания их положения в развале горной массы. Это могут быть радиомаркеры или различные закладные элементы в виде деревянных брусков или отрезков прочной ленты с реперными отметками, содержащими сведения о месте закладки маяка – номере специальной скважины и глубине размещения в ней маяка.

В случае использования радиомаркеров, для определения местоположение в развале горной массы после взрыва, их вначале поочередно активируют, а затем их местоположение определяется с помощью устройств обнаружения радиомаркеров,

например, RSearch на глубине до 15 м. Полученные координаты и глубина нахождения радиомаркеров заносятся в специализированное программное обеспечение, в котором определяется контур рудного тела после взрыва в 3D формате. Положение закладных элементов или их фрагментов в развале фиксируют электронным тахеометром в процессе круглосуточного мониторинга экскавации взорванной горной массы.

Главный смысл всех этих способов заключается в постоянном применении на каждом взрыве. Наша задача видится иначе: оценить для определенной схемы взрывания в конкретных горных породах границы смещения в развале контактов «руда–порода», выявленных по данным опробования взрывных скважин, и создать технологию взрывного рыхления, обеспечивающую именно минимальные смещения в заданном конкретном интервале границ рудного тела. Эти границы затем выносятся на поверхность развала горной массы и служат ориентиром в работе выемочной техники.

При совершенствовании буровзрывных работ, проводимых подрядной организацией ООО «АВТ-Амур» на карьерах ООО «Албынский рудник» с целью снижения разубоживания на рудных блоках, специалистами ЗАО «АВ-Технология» в 2013 году был разработан комплекс мер, способствующих снижению подвижек горной массы в контурах рудо содержащих блоков, а также систем мониторинга смещения горной массы внутри взорванного массива. В их числе: исключить применение порядной схемы инициирования на рудо содержащих блоках переходом на диагональную; произвести экспериментальные массовые взрывы с применением радиомаяков с целью определения целесообразности их применения.

В течение полугода было взорвано 18 экспериментальных блоков общим объёмом свыше 700 тыс. м³ с установкой 98 радиомаяков. Общее число замеренных смещений маяков составило 83 шт., 15 радиомаяков после взрыва обнаружить не удалось. Тем не менее, это количество существенно превышает необходимый минимум для обеспечения заданных параметров точности экспериментальных измерений. По результатам этих экспериментов построен тренд, показывающий, что с увеличением интервала замедления в схемах взрывания существенно снижается величина смещений радиомаяков (рис. 1).

В процессе исследования смещения горной массы при интервалах замедления от 150 до 400 мс было установлено, что для получения приемлемых результатов оценки фактической величины смещения горной массы на блоке достаточно комплекта из 4-5 специальных скважин с закладными элементами. После проведения нескольких опытных взрывов с предлагаемой схемой взрывания в конкретных горных породах определяется средняя величина смещения контакта, по которой и выносятся на поверхность взорванной горной массы положение контактов «руда-порода» в ней.

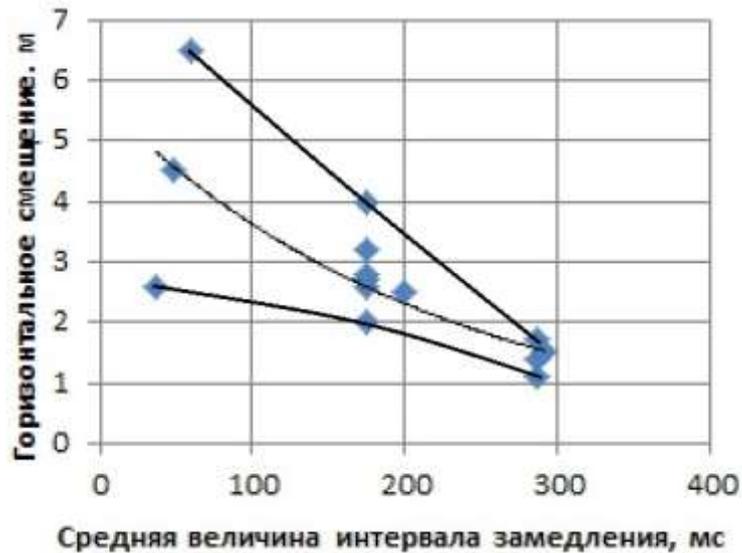


Рис. 1. Взаимосвязь величины смещения горной массы с интервалами замедления

Динамика развития массовых взрывов и параметры развала горной массы – один из важнейших, если не самый важный, вопрос исследования качественных параметров взрывных работ, которым занимаются теоретики и практики взрывного дела на протяжении многих лет. Наиболее известным и простым способом инструментальной регистрации процесса взрыва является метод видеорегистрации с последующим измерением по каждому стоп-кадру перемещений реперных точек. С переходом на ведение взрывных работ подрядными организациями практически на всех горных предприятиях ведется видеосъемка каждого массового взрыва для исключения разногласий при оценке как самого процесса взрывания, так и его результатов и последствий.

Моделирование процессов развития массовых взрывов во времени и пространстве нами проводилось графическим способом с масштабированием по применяемым схемам взрывания на конкретных промышленных блоках. Радиус зоны трещинообразования может достичь предельной величины в 40 радиусов заряда ($R_{зар}$), а радиус зоны предразрушения – величины в $(200-250)R_{зар}$, т. е. 22-27,5 м при $R_{зар}=0,1$ м. Для построения графической модели ориентировочную величину зоны трещинообразования принимали 9 м, а зоны предразрушения – 44 м. Волны напряжения поглощаются в зоне трещинообразования взорванных скважин, что необходимо учитывать при построении последующих зон предразрушения – они выглядят в виде секторов окружностей различной конфигурации. Районы расположения скважинных зарядов, попадающие в зоны перекрытия секторов предразрушения дважды подвергаются воздействию волн напряжения (рис. 2).

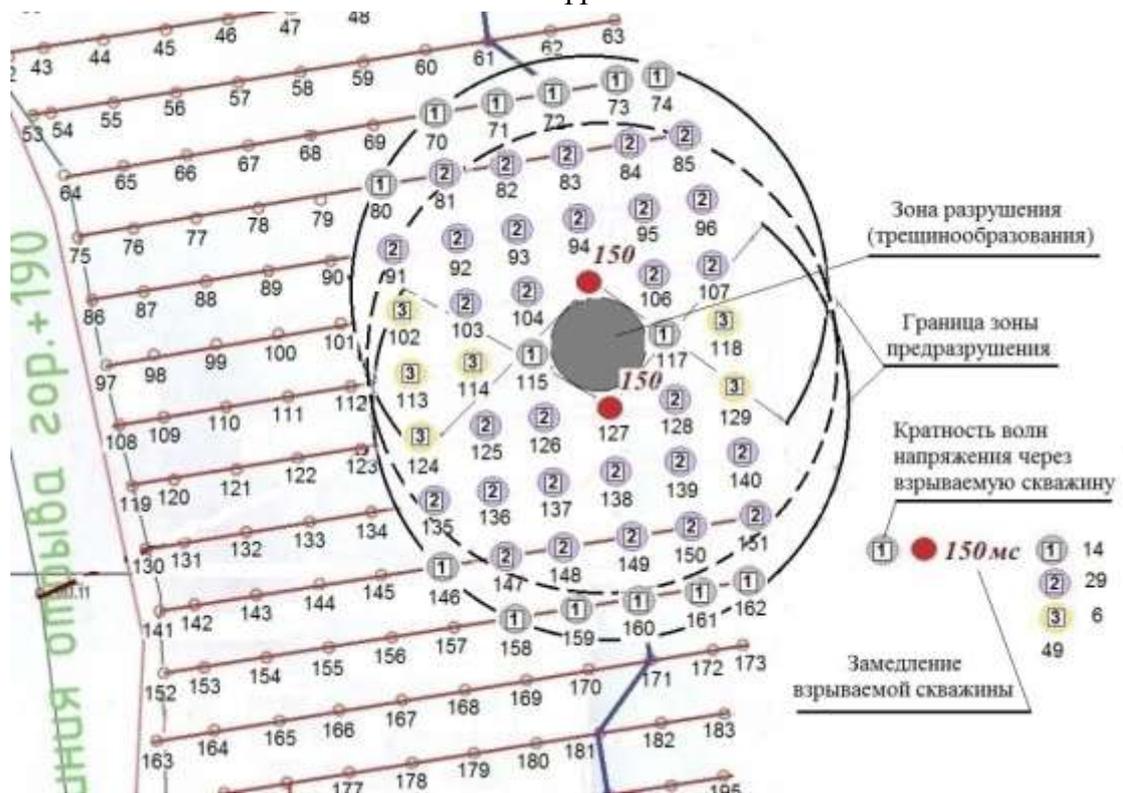


Рис. 2. Графическая модель формирования зон трещинообразования и предразрушения от взрыва двух врубовых зарядов на ступени замедления 150 мс

Третья глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям взрывного рыхления пород с минимальным перемешиванием. Для ценных руд благородных металлов нужны методы взрывного рыхления с минимальным физическим смещением контактов «руда-порода».

Известно, что при МКЗВ наилучшее качество дробления достигается при полном развитии независимых максимальных зон дробления от взрыва каждого из зарядов с образованием наибольшего числа обнаженных поверхностей около взрываемых зарядов. Многократное взрывное нагружение массива горных пород при реализации принципа «один заряд – одна ступень замедления» способствует образованию дополнительных поверхностей обнажения, что, в сочетании с увеличенными интервалами замедления, позволяет радикально повысить качество дробления горной массы. В поликристаллических горных породах негидростатические сжимающие напряжения могут приводить к возникновению локальных напряжений растяжения, обеспечивающих возможность развития микродефектов, т.е. предразрушения. Структура области предразрушения породы определяется как кластер – связанные каналы сложной геометрии. На стадии предразрушения он не ведёт к дезинтеграции породы, но может в значительной степени изменить её проницаемость и при последующем нагружении породы зона предразрушения развивается в область дезинтеграции породы с образованием трещин. Область предразрушения может превышать радиус взрывной полости в 30 – 100 раз, – это самая

масштабная область по размеру изменений в массиве пород при взрыве. Многократное воздействие взрывных нагрузок с большим интервалом замедления вызывает разупрочнение массива пород за счёт возникающих микронарушений. Картина и характер разрушения определяется накоплением нарушений от цикла к циклу и формированием множественной структуры разрушения. Следовательно, необходимо обеспечить многократное циклическое воздействие на массив горных пород волн напряжения от последовательных взрывов скважинных зарядов с увеличенным замедлением между ними, позволяющим завершить все процессы прорастания и слияния дислокаций и микронарушений в трещины, происходящие с невысокой скоростью.

При подготовке к выемке полезного ископаемого, которое впоследствии будет измельчаться при обогащении, рационально увеличить долю энергии взрыва на дробление и измельчение рудной массы, поскольку механические способы дробления руды и, особенно, измельчения мельницами, несравнимо более энергоёмки. Однако повышение взрывной нагрузки не должно увеличивать смещение взорванной горной массы – необходимо максимально сохранить естественные контакты «руда–порода» в развале горной массы для применения селективной выемки руд с целью снижения разубоживания руд. Такие показатели обеспечиваются только при взрывном рыхлении пород с межскважинными замедлениями выше 100 мс.

Для оценки предварительного разрушения взрываемого горного массива проведено графическое моделирование числа волн напряжения от взрыва зарядов в предыдущих ступенях замедления, прошедших через районы расположения скважинных зарядов последующих ступеней замедления, на примере массовых взрывов промышленных блоков. Один из блоков взорван с использованием неэлектрических систем инициирования «RIONEL»: в поверхностной сети использованы детонаторы X–200 с номиналом замедления 200 мс, в скважинных боевиках – детонаторы LP–50 с номиналом замедления 5000 мс. Схема взрывания: врубовый ряд с замедлением между соседними скважинами 400 мс (2 последовательно соединённых детонатора X–200) расположен на середине блока по всей его длине, в перпендикулярном направлении (по рядам скважин) замедление 200 мс. Для построения графической модели развития взрыва радиус зоны разрушения принят $35R_{зар}$ (3,7 м), а радиус зоны предразрушения – $250R_{зар}$ (26,7 м), что пятикратно перекрывает размер сетки скважин). Приняты условия построения модели: зона разрушения предыдущих взорванных зарядов поглощает волну напряжений; при наложении на район расположения какого-либо скважинного заряда зон предразрушения, сформированных одновременно взрываемыми зарядами, он подвержен действию всех приходящих волн напряжения, независимо от направления прихода волны – это обуславливает знакопеременность и разнонаправленность воздействий. Исходя из этих условий, проанализируем развитие массового взрыва на выбранном участке.

На рис. 3 показано взаимодействие волн напряжения в зонах предразрушения при взрыве зарядов на ступени замедления 200 мс.

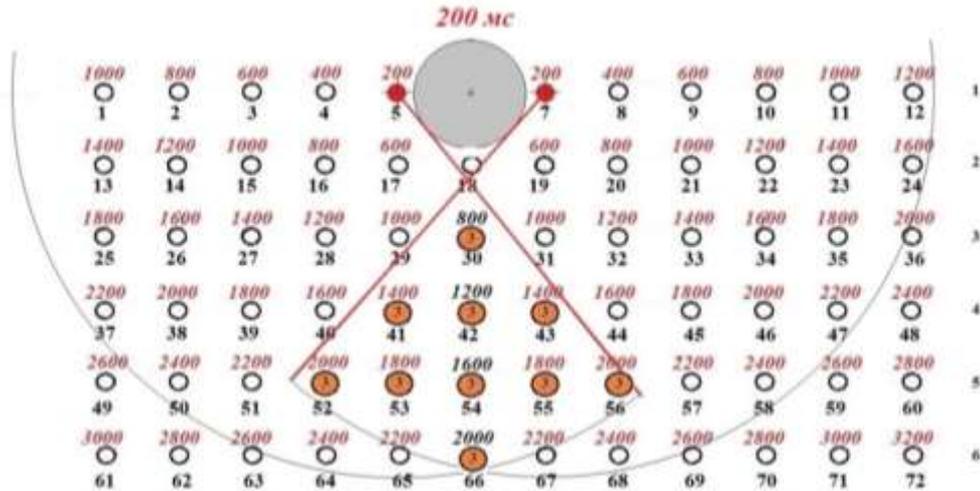


Рис. 3. Наложение волн напряжения в зонах предразрушения ступени замедления 200 мс

Под кружком скважинного заряда указан его порядковый номер в схеме, над ним – время срабатывания от начала взрыва. Число скважин в рядах четное (12), а врубовый ряд расположен посередине, поэтому возникает асимметрия: слева 5 зарядов, справа – 6. Зоны предразрушения, формируемые взрывами зарядов 5 и 7, ограничены лучами, выходящими из их центров касательно зоне разрушения ранее взорванного заряда 6 до пересечения с окружностью радиусом $250R_{зар}$, и простираются до 6-го ряда скважин. Под действие волн напряжения попадают районы расположения 57 скважинных зарядов. Зоны предразрушения в первом ряду охватывают по 5 скважинных зарядов справа и 4 – слева (та самая асимметрия). Во втором ряду в эти зоны попадают 12 зарядов (13–24), но район заряда 18 не подвергается действию волн напряжения, находясь «в тени» зоны разрушения ранее взорванного заряда 6. В третьем ряду зоны предразрушения охватывают уже только 11 зарядов, но при этом через район расположения заряда 30 проходит уже две волны напряжения с противоположных направлений.

Таким образом, при одновременном взрыве зарядов 5 и 7 волны напряжения прошли однократно через районы расположения 46 зарядов, дважды – через район расположения 10 зарядов, а район расположения заряда 13 на данной ступени замедления действию волн напряжения не подвергался. По этому принципу проводился анализ развития массового взрыва на каждой ступени замедления, и на рис. 4 приведено суммарное количество волн напряжения, прошедших через районы расположения скважинных зарядов, расположенных по 12 в ряду. Внутри кружка, обозначающего заряд, указано суммарное количество волн напряжения, прошедших через район расположения заряда к моменту его срабатывания. Поскольку изменение показателей стабилизировалось на уровне 6-го ряда, приводим динамику только по 7 рядам сработавших скважинных зарядов. Асимметрия расположения скважинных зарядов относительно вруба привела к интересному эффекту. В левой части 7-го ряда нарастание числа прошедших волн напряжения от вруба к краю блока выглядит следующим образом: 21, 24, 27, 29, 28, а в правой – 21, 24, 28, 31, 32, 28.

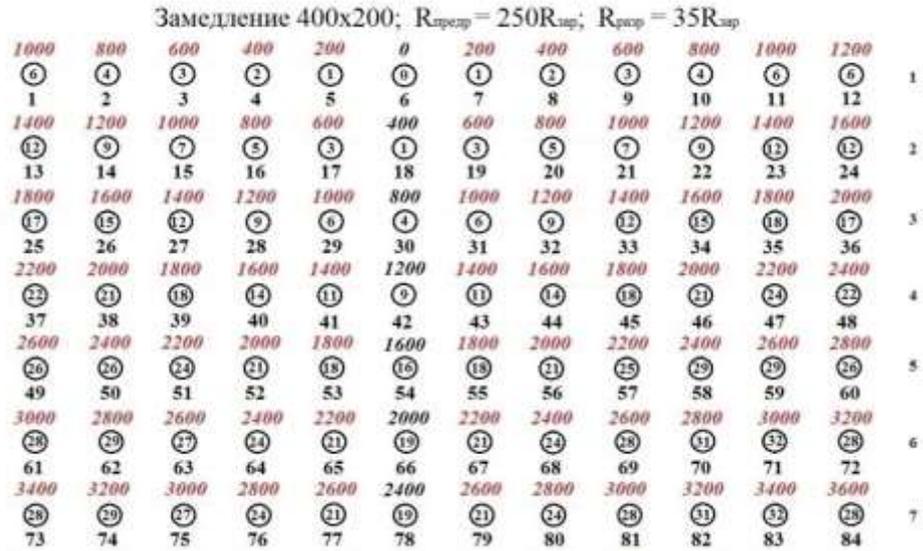


Рис. 4. Количество волн напряжения, прошедших через районы расположения скважинных зарядов

Таким образом, наличие дополнительного скважинного заряда в ряду, при их малом количестве, существенно меняет картину воздействия волн напряжения в зоне предразрушения по разные стороны от центрального вруба. Причём эти различия начинаются уже с третьего ряда. Причина такого явления раскрывается при графическом анализе процессов развития массового взрыва на ступени замедления в 1200 мс, приведённом на рис. 5.

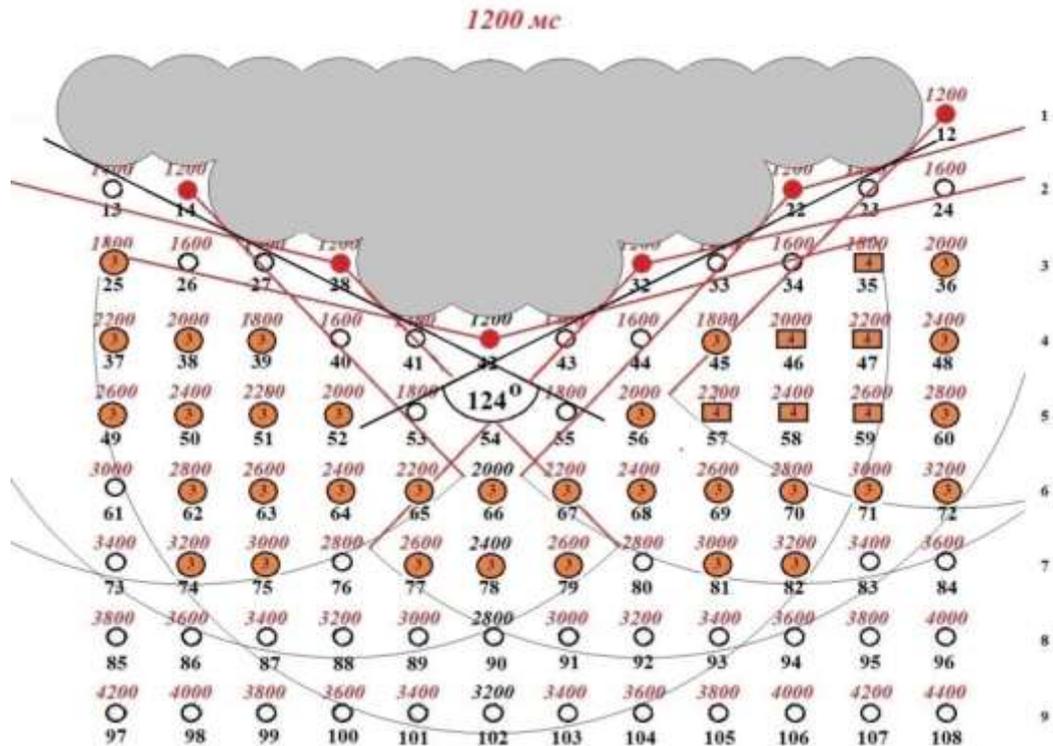


Рис. 5. Графический модель развития взрыва к моменту 1200 мс

Скважинные заряды срабатывают в каждом ряду, но через скважину. Всего в зонах предразрушения шести одновременно срабатывающих зарядов, достигающих 9-го ряда, расположено 66 скважинных зарядов. Если провести касательные к зонам разрушения ранее сработавших скважинных зарядов образуется клин с углом при вершине 124° . На районы расположения заряда 31 на этой ступени замедления одновременно воздействуют две волны напряжения. С учётом заряда врубового ряда обеспечивается 4-х кратное прохождение волн напряжения только на район расположения 6-ти зарядов правой части схемы.

Динамика прохождения волн напряжения приведена на рис. 6.

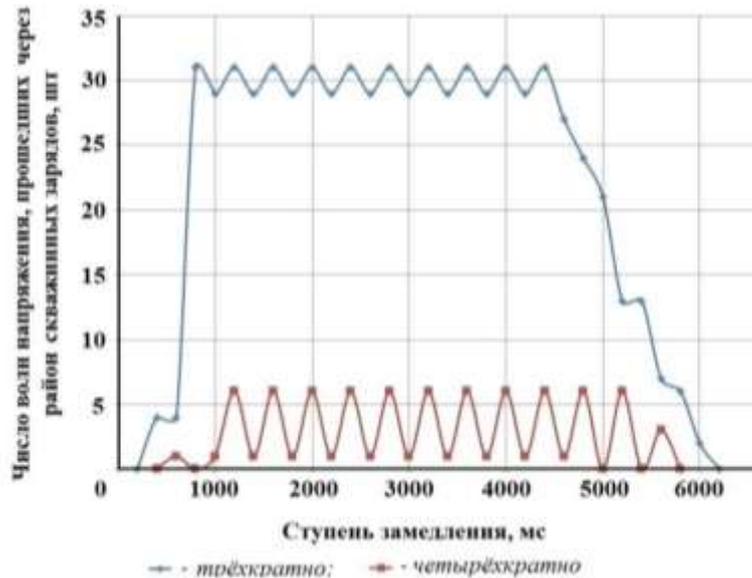


Рис. 6. Динамика волн напряжений в зонах предразрушения

Прежде всего, необходимо обратить внимание на характерную пульсацию числа волн напряжения, прошедших в зонах предразрушения через районы расположения скважинных зарядов, при переходе от одной ступени замедления к другой. Причина, по нашему мнению, в величине угла при вершине клиновидной схемы развития взрыва, который составил 124° (см. рис. 5).

При замене схемы замедления 400×200 мс на схему 200×400 мс угол при вершине врубового клина из тупого переходит в острый – 54° , зоны предразрушения вытягиваются вдоль врубового ряда, а не поперёк, как в схеме 400×200 мс, во врубовом ряду заряды срабатывают в каждой ступени замедления, а не через одну. Параметры воздействия волн напряжений в зоне предразрушения коренным образом меняются. По обе стороны от вруба появляются 5-ти кратные воздействия волн напряжения, существенно увеличивается размер общей зоны предразрушения, распространяясь на ступени замедления 1800 мс на весь участок в 15 рядов (рис. 7). Срабатывание врубовых скважинных зарядов в каждой ступени замедления снимает эффект пульсации – нарастание и спад числа воздействий волн напряжения на районы расположения скважинных зарядов происходит плавно (рис. 8).

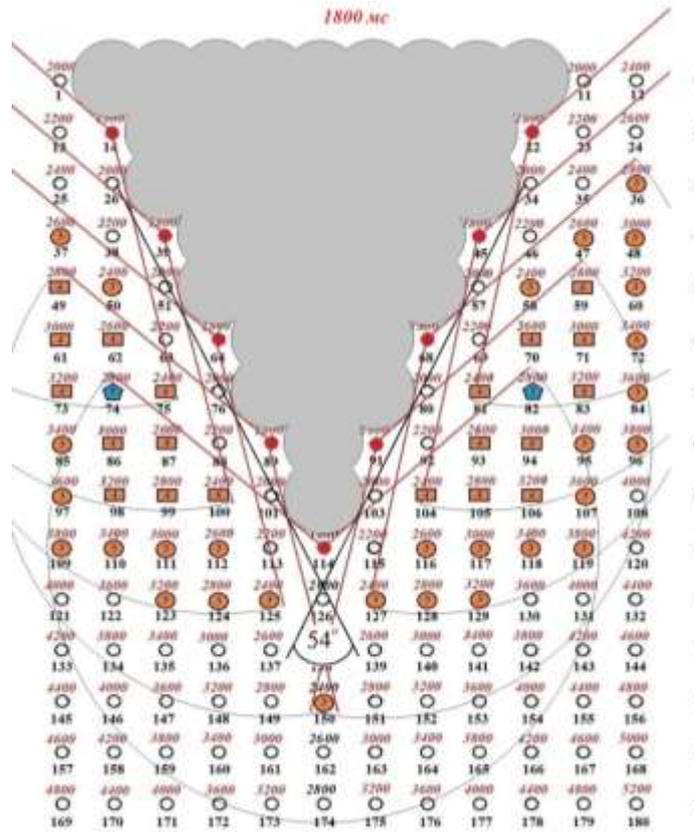


Рис. 7. Графическая модель развития массового взрыва по схеме 200×400 м к моменту 1800 мс

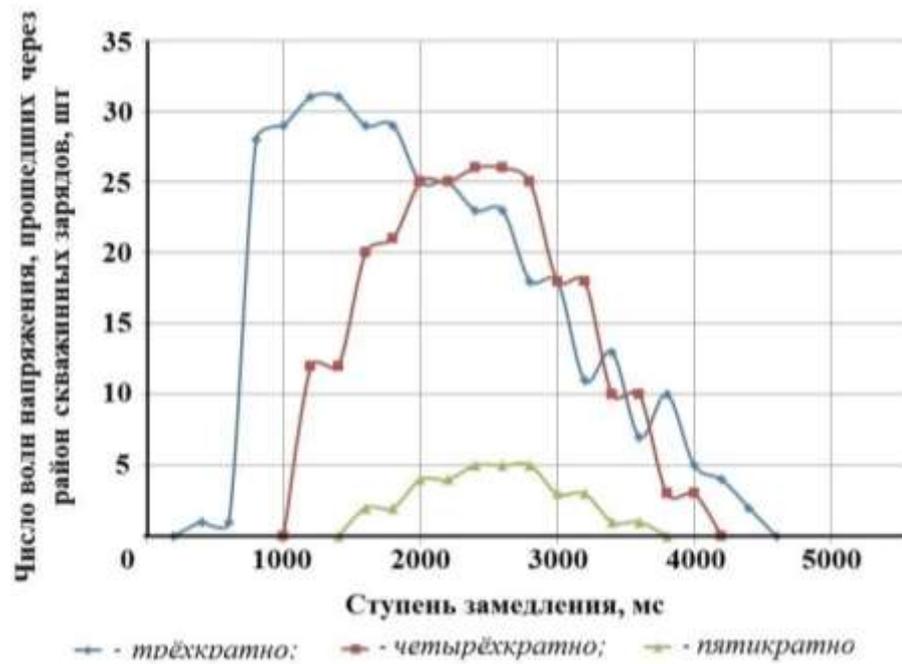


Рис. 8. Динамика волн напряжений в зонах предразрушения при схеме взрывания 200×400 м

При этом число трёхкратных воздействий волн напряжения сохраняется на уровне 29 – 31 (см. рис. 6), число четырёхкратных воздействий возрастает до 3–26 и, самое важное, – появляются пятикратные воздействия на уровне 1–5. Применение схемы взрывания 200×400 мс со смещённым к краю блока врубом позволит получить 5-кратное прохождение волн напряжения через районы расположения зарядов даже на весьма узких блоках с шестирядным расположением скважин.

Нами создано техническое решение, защищенное патентом РФ № 2744534, позволяющее удвоить количество волн напряжения, проходящих через основную площадь взрываемого блока. В поверхностной сети во врубовых рядах устанавливаются замедление не менее 100 мс, а в отбойных скважинных зарядах в рядах, расположенных перпендикулярно врубовым рядам, интервал замедления составляет вдвое больше. Иницирование поверхностной сети скважинных зарядов блока проводят с противоположных концов врубовых рядов навстречу друг другу. На графической модели видно (рис. 9), что к концу развития массового взрыва наибольшее число волн напряжения, прошедших от двух врубовых рядов с взаимным наложением через район расположения скважинных зарядов 100 и 126, достигло 69, увеличиваясь более чем вдвое.

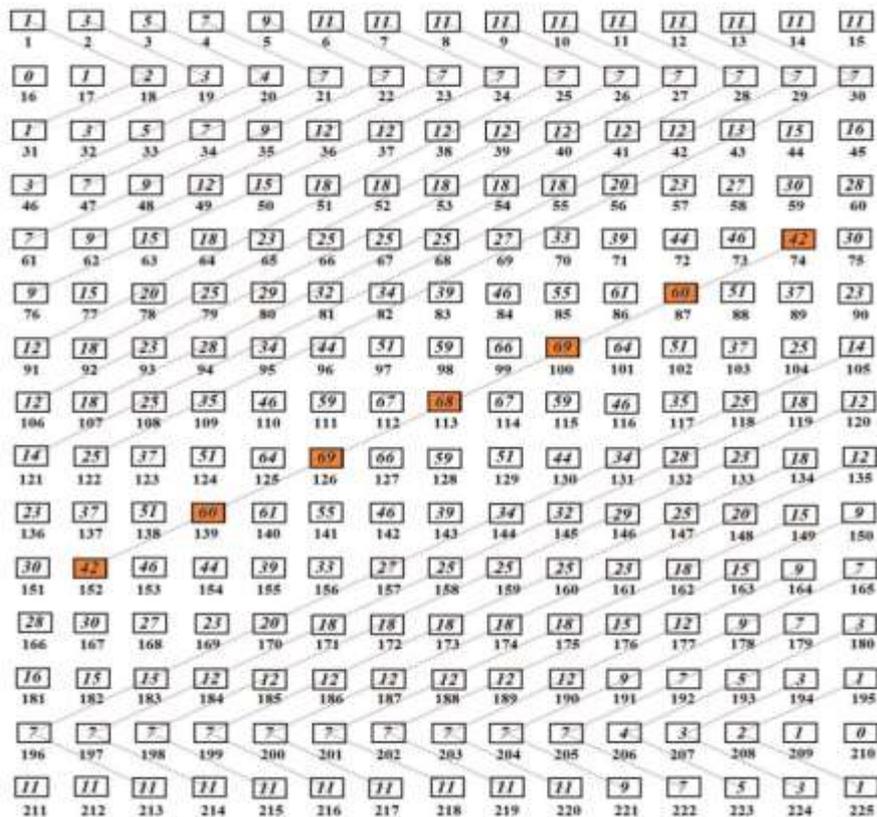


Рис. 9. Общее количество волн напряжения, прошедших через зоны расположения скважинных зарядов в процессе развития массового взрыва

Преимущества различных схем взрывания на участке блока с 12-ю скважинами в ряду приведены в таблице.

Сравнительные показатели работы различных схем взрывания

Схемы взрывания для 12 зарядов в ряду				
Врубовой ряд	посередине блока		по краю блока	
Схема взрывания	400×200 мс	200×400 мс	400×200 мс	200×400 мс
Степень замедления, мс	1800	1800	1800	1800
сработало зарядов, шт (%)	45 (25)	50 (28)	35 (19)	38 (21)
зарядов в зоне предразрушения, шт	65 в 3–10 рядах	108 в 1–15 рядах	65 в 1–10 рядах	83 в 1–15 рядах
волны напряжения через район зарядов свыше 3-х, шт (%), из них:	30 (46)	52 (48)	32 (49)	30 (36)
в том числе:				
3 воздействия	29 (45)	29 (26,8)	21 (32,3)	19 (23)
4 воздействия	1 (1)	21 (19,4)	10 (15,4)	10 (12)
5 воздействий	нет	2 (1,8)	1 (1,3)	1 (1)
в ступени замедления заряды срабатывают:	в каждом ряду; справа от вруба 3 заряда, слева 2 и 1 врубовый	через ряд; справа и слева от вруба по 4 заряда и 1 врубовый	в каждом ряду; справа от вруба 5 зарядов, слева – 1	через ряд; справа от вруба 4 заряда, слева – 1 и 1 врубовый
во врубовом ряду заряды срабатывают:	через ступень замедления	в каждой ступени замедления	через ступень замедления	в каждой ступени замедления
Степень замедления, мс	2800	2800	2800	2800
сработало зарядов, шт (%)	75 (41,7)	108 (60)	65 (36)	77 (43)
зарядов в зоне предразрушения, шт	66 в 6–15 рядах	108 в 4–15 рядах	66 в 4–13 рядах	78 в 1–15 рядах
волны напряжения через район зарядов свыше 3-х, шт (%), из них:	37 (56)	54 (50)	35 (53)	51 (65,4)
3 воздействия	31 (47)	23 (21,3)	19 (28,8)	25 (32)
4 воздействия	6 (9)	26 (24)	14 (21,2)	22 (28,2)
5 воздействий	нет	5 (4,7)	2 (3)	4 (5,2)
в ступени замедления заряды срабатывают:	в каждом ряду; справа и слева от вруба по 3 заряда	через ряд; справа от вруба 6 зарядов, слева – 5 и 1 врубовый	в каждом ряду; справа от вруба 5 зарядов и 1 врубовый	через ряд; справа от вруба 7 зарядов, слева – 1 и 1 врубовый
Показатели по схемам в целом:				
волны напряжения через район зарядов свыше 3-х, шт, из них:	770	652	790	762
3 воздействия, шт (%)	690 (89,6)	363 (55,7)	479 (60,6)	401 (52,6)
4 воздействия, шт (%)	80 (10,4)	254 (39)	278 (35,2)	309 (40,5)
5 воздействий, шт (%)	нет	35 (5,3)	33 (4,2)	52 (6,9)

На рис. 10, где приведены расчетные параметры группы скважинных зарядов для блока на 5-ти метровом уступе, видно, что размеры площади трещинообразования обеспечивают взаимное наложение зон трещинообразования с выходом на поверхность уступа.

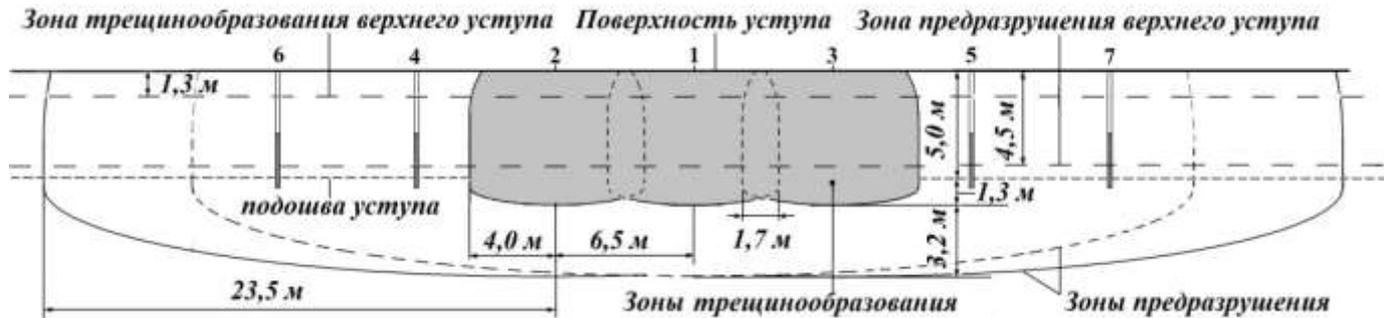


Рис. 10. Параметры зон трещинообразования и предразрушения группы скважинных зарядов

Многочисленные прохождения волн напряжения в стадии сжатия-растяжения через окрестности скважинных зарядов в зоне предразрушения существенно увеличивает трещиноватость массива горных пород, способствуя его расчленению на более мелкие фракции, в том числе и ниже подошвы уступа на глубину 4,5 м, при том, что глубина перебура составляет всего лишь 0,5–0,6 м.

Схемы взрывания с межскважинными замедлениями выше 200 мс за два года промышленного применения показали весьма высокий качественный результат – наряду с существенным снижением размеров кусков в горной массе минимизируется развал горной массы – он практически весь остаётся в контурах блока. Сохраняются первичные контакты «руда-порода» со смещением 0,8 – 1,3 м при коэффициенте разрыхления 1,4 – 1,48, позволяя осуществлять раздельную выемку руд с минимальным примешиванием пустых пород.

На узких протяжённых блоках (их сейчас на карьерах большинство) с числом скважин в ряду, сопоставимым с размером зоны предразрушения, предпочтительны схемы взрывания 200×400 мс, как обладающие наиболее высокими качественными показателями ослабления прочности горных пород в зоне предварительного разрушения массива горных пород – доля одновременного воздействия волн напряжения более четырёхкратного достигает 47,4 %.

Учитывая современное состояние волноводных средств инициирования, когда максимальный параметр замедления поверхностных систем составляет 200 мс (для получения замедления 400 мс необходимо последовательно соединять два капсуля), экономически предпочтительнее выглядит схема взрывания 400х200 мс с расположением врубового ряда по краю блока в его глубине.

Четвертая глава посвящена увеличению использования энергии взрыва на дробление за счет использования за счет экранирования волн напряжения ранее взорванной горной массы при увеличении интервалов замедления сверх 100 мс.

На схемах взрывания в формате 150×200 мс с врубом в тыльной части блока получены отличные результаты как в качестве дробления, так и в сохранности бортов карьера даже при неполном использовании возможностей экранирования волн напряжения. Поэтому мы поставили и решили техническую задачу повышения интенсивности дробления горных пород при сохранении естественной геологической структуры рудных тел за счёт максимального использования экранирования волн напряжения разрушенной зоной ранее взорванных зарядов по принципу «один заряд – одно замедление» изменением схем взрывания и интервалов замедлений.

На рис. 11 приведена графическая модель взаимодействия волн напряжения срабатывающих зарядов с экранирующими поверхностями при разных схемах взрывания, а на рис. 12 показано изменение величины дополнительной энергии, преломленной в горную массу при разных схемах взрывания.

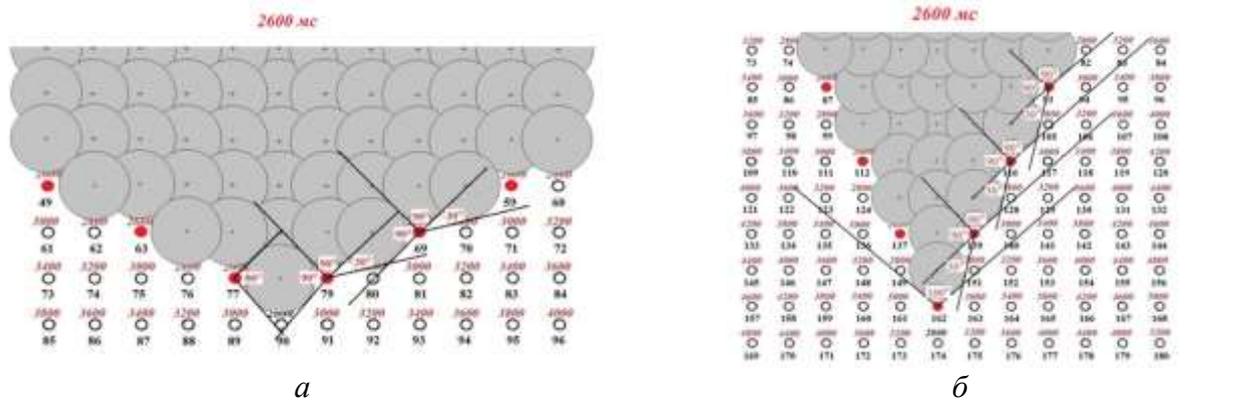


Рис. 11. Графическая модель взаимодействия волн напряжения срабатывающих зарядов с экранирующими поверхностями при схеме взрывания 400×200 мс (а) и 200×400 (б)

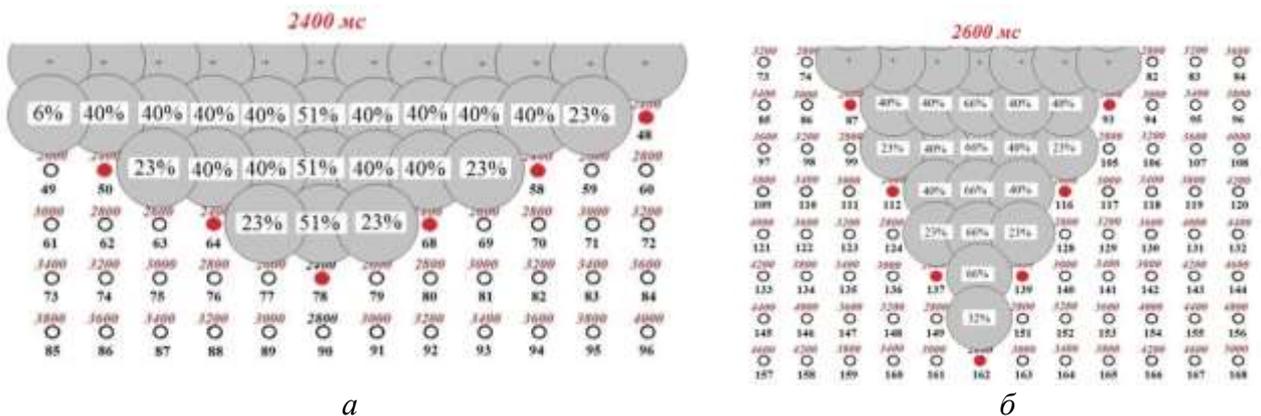


Рис. 12. Дополнительная энергия волн напряжения, преломленная в разрушенные породы при схеме взрывания 400×200 мс (а) и 200×400 (б)

Таким образом, изменение схемы взрывания с 400×200 мс на схему 200×400 мс позволяет увеличить количество преломленной энергии в ранее взорванную горную массу на 30 %, что подтверждено экспериментальными взрывами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационное исследование является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований, решена важная научно-техническая задача – разработана и внедрена в практику открытых горных работ технология многорядного короткозамедленного взрывания с увеличенными интервалами замедлений, обеспечивающая повышение эффективности подготовки скальных горных пород к выемке с сохранением первичных контактов «руда–порода» для обеспечения возможности снижения разубоживания при селективной выемке руд, что имеет существенное значение для развития горнорудной промышленности России.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Выполнен системный анализ отечественного, зарубежного опыта и патентно-защищённых технических решений по снижению перемешивания руд и пород в развале взорванной горной массы. Выявлено, что управление взрывным рыхлением горных пород различной прочности основано на применении комплекса технических решений, направленных на увеличение времени действия продуктов взрыва на взрывааемый массив, чтобы трещины разрушения проросли на большую величину. Главную роль в этом комплексе играют интервалы замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов, с увеличением которых возрастает роль зоны предварительного разрушения горных пород, в которой обеспечивается увеличение трещиноватости массива горных пород за счет многократного знакопеременного циклического нагружения его волнами напряжения в стадии растяжения с накопительным эффектом.

2. Разработана и внедрена в практику ведения взрывных работ в ГК ПЕТРОПАВЛОВСК технология МКЗВ с интервалами замедления, увеличенными до 150×200 мс, по схеме «одна скважина – одно замедление», позволившая увеличить выход горной массы с 1 пог. м скважины на 56 %, не снижая ее качества, снизить удельный расход ВВ на 20 %.

3. Схемы взрывания с межскважинными замедлениями выше 200 мс за два года промышленного применения показали весьма высокий качественный результат увеличения нарушенности массива в зоне предразрушения за счёт многократной циклической нагрузки волнами напряжения в стадии растяжения. При этом, наряду с существенным снижением размеров кусков в горной массе, наблюдается эффект минимизации параметров развала – он практически весь остается в контурах блока, сохраняя первичные контакты «руда–порода» со смещением 0,8–1,3 м при коэффициенте разрыхления 1,4–1,48 и увеличении выхода горной массы с 1 пог. м скважины с 17 до 26–30 м³. Коэффициент использования скважины доведен до значения 0,9.

4. Разработан и защищен патентом РФ № 2723419 «Способ отработки локальных участков оруденения в крепких горных породах», в котором при обурировании вскрышных блоков проводят валовое опробование всех взрывных скважин, выявленные локальные участки оруденения промышленного характера выделяют

на плане взрываемого блока и проводят взрывание вскрышного блока с интервалами замедлением выше 300 мс, с увеличением размера контура границ локального участка оруденения на поверхности развала горной массы на 1-2 м. При использовании неэлектрических волноводных систем инициирования устанавливаются скважинные замедлители величиной 3000-5000 мс. Это позволило снизить процент разубоживания по сравнению с МКЗВ с интервалами замедления 150×200 мс в среднем с 8,8 до 7,6 % и тем самым уменьшить на 22 % потери полезного ископаемого.

5. Разработан и защищен патентом РФ № 2744534 «Способ ведения взрывных работ с учетом зоны предразрушения», в котором подают стартовый импульс на взрывание одновременно на два врубовых ряда с противоположных концов врубовых рядов навстречу друг другу, интервал замедления во врубовых рядах принимают не ниже 100 мс, а в перпендикулярном направлении, по рядам отбойных скважин, – вдвое выше. Количество волн напряжения, проходящих через большую часть зоны предразрушения возрастает вдвое, а за счет эффекта экранирования волн напряжения ранее взорванной горной массой существенно возрастает КПД взрыва на рыхление горной массы.

Основные положения диссертации опубликованы:

В изданиях, рецензируемых базами Web of Science и Scopus:

1. Плотников, А. Ю. Взрывное рыхление пород на карьерах с большими замедлениями / Е. Б. Шевкун, А. В. Лещинский, Ю. А. Лысак, А. Ю. Плотников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 29–41. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-10-0-29-41.

2. Features of schemes of the explosive loosening, with big slowdowns / A. Leshchinskiy, E. Shevkun, Yu. Lysak, A. Plotnikov // E3S Web of Conferences: 8, Khabarovsk, 08–10 сент. 2020 г. – Khabarovsk, 2020. – P. 01024. – (8th International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources», PCDG 2020). – DOI 10.1051/e3sconf/202019201024.

3. Plotnikov, A. Yu. Special aspects of explosive loosening with minimal rock displacement / E. Shevkun, A. Leshchinsky, A. Plotnikov // VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources» : Web of Conferences. – 2020. – № 192. – P. 01003.

4. Plotnikov, A. Yu. Development of Complex Ore Zones / E. B. Shevkun, A. V. Leshchinsky, A. Yu. Plotnikov // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666. – P. 062023.

5. Plotnikov, A. Yu. The choice of explosion parameters for obtaining specified precollapse of a rock mass / A. V. Leshchinskiy, E. B. Shevkun, Y. A. Lysak, A. Y. Plotnikov, O. A. Kostyunina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 666. – P. 052061.

6. Plotnikov, A. Yu. Analyzing methods of determining pre-destruction of blast hole vicinity / Ye. B. Shevkun, A. V. Leshchinsky, E. A. Shishkin, Yu. A. Lysak, A. Yu.

Plotnikov // Nexo Revista Científica. – 2021. – Vol. 34, № 4. – P. 1448-1460. – DOI 10.5377/Nexo.v34i04.12691.

7. Плотников, А. Ю. Взрывное рыхление горных пород на карьерах группы компаний «Петропавловск»/ Ю. А. Лысак, А. Ю. Плотников, Е. Б. Шевкун, А. В. Лещинский // Горный журнал. – 2022. – №2. – С. 45– 50. – DOI: 10.17580/gzh.2022.02.07

В изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

8. Плотников, А. Ю. Оптимизация параметров взрывных работ увеличением интервалов замедления / Ю. А. Митюшкин, Ю. А. Лысак, А. Ю. Плотников и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 4. – С. 341–348.

9. Плотников, А. Ю. Особенности взрывного рыхления при увеличенных интервалах замедления / Е. Б. Шевкун, А. В. Лещинский, Ю. А. Лысак, А. Ю. Плотников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 272–282.

10. Плотников, А. Ю. Влияние схем взрывания на процессы в зоне предварительного разрушения / Е. Б. Шевкун, А. Ю. Плотников // Маркшейдерия и недропользование. – 2021. – № 4. – С. 23–34.

11. Плотников А. Ю. Взрывное рыхление скальных пород без развала горной массы / Е. Б. Шевкун, // Маркшейдерия и недропользование. – 2022. – №3. – С. 47–53.

В прочих изданиях:

12. Плотников, А. Ю. Оценка смещения горных пород в процессе массового взрыва / А. В. Лещинский, А. Ю. Плотников, Е. Б. Шевкун // Ученые заметки ТОГУ. – Хабаровск, 2020. - Т. 11, № 1. - С. 252-262.

13. Плотников, А. Ю. Особенности взрывного рыхления с минимальным перемешиванием пород / Е. Б. Шевкун, А. Ю. Плотников // Ученые заметки ТОГУ. – Хабаровск, 2021. – Т. 12, № 2. – С. 176–188.

14. Плотников, А. Ю. Определение рациональной схемы взрывания с учетом интенсивности предварительного разрушения массива скальных пород / А. В. Лещинский, Е. Б. Шевкун, Ю. А. Лысак, А. Ю. Плотников // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденция развития : сб. статей III Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 5 марта 2020 г. – Петрозаводск : Междунар. центр науч. партнерства «Новая Наука», 2020. – С. 160-167.

15. Плотников, А. Ю. Рыхление скальных горных пород взрыванием без развала горной массы / Е. Б. Шевкун, А. Ю. Плотников // Ученые заметки ТОГУ. – Хабаровск, 2021. – Т. 13, № 3. – С. 176–188.

Патенты на изобретения Российской Федерации:

16. **Патент № 2655009** С1 Российская Федерация, МПК F42D 3/04. Способ определения оптимальных параметров взрывного разрушения горных пород с учетом зоны предразрушения : № 2017107953 : заявл. 10.03.2017 : опубл. 23.05.2018 / А. В. Лещинский, Е. Б. Шевкун, Ю. А. Лысак, А. Ю. Плотников ; заявитель Тихоокеан. гос. ун-т. – 13 с.

17. **Патент № 2723418** С1 Российская Федерация, МПК F42D 3/04. Способ определения размеров зоны предразрушения в массиве горных пород : № 2019139910 : заявл. 05.12.2019 : опубл. 11.06.2020 / Е. Б. Шевкун, А. В. Лещинский, Е. А. Шишкин, А. Ю. Плотников ; заявитель Тихоокеан. гос. ун-т. – 9 с.

18. **Патент № 2723419** С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42D 3/04, E21C 41/30. Способ отработки локальных участков оруденения в крепких горных породах : № 2019143882 : заявл. 23.12.2019 : опубл. 11.06.2020 / Е. Б. Шевкун, А. В. Лещинский, А. Ю. Плотников, Д. В. Дрокин ; заявитель Тихоокеан. гос. ун-т. – 16 с.

19. **Патент № 2744534** С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42D 3/04, E21C 41/26. Способ ведения взрывных работ с учетом зоны предразрушения: № 2020132515 : заявл. 30.09.2020 : опубл. 11.03.2021 / Е. Б. Шевкун, А. В. Лещинский, А. Ю. Плотников, Е. А. Шишкин ; заявитель Тихоокеан. гос. ун-т. – 12 с.