

6  
А-39

Министерство угольной промышленности СССР  
Академия наук СССР  
Институт горного дела им А.А.Скочинского

---

На правах рукописи

Канд. техн. наук Е. Г. БАРАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ВЗРЫВОМ  
ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ  
СЛОЖНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Специальность 05.312 – "Открытая  
разработка и эксплуатация  
угольных, рудных и  
нерудных месторождений"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва  
1971

## В В Е Д Е Н И Е

На территории СССР за последние годы открыты крупнейшие месторождения железных руд, руд цветных и редких металлов, обеспечивающих на многие десятилетия твердую и постоянную сырьевую базу черной и цветной металлургии страны. Большинство из них пригодно для открытой разработки и относится к категории сложных. Обобщение и анализ опыта разработки таких месторождений показали, что в настоящее время до 90% карьеров цветной металлургии применяют при первичном рыхлении рудных массивов вертикальные и наклонные скважинные заряды большого диаметра (200-320 мм) при однорядном и двухрядном их расположении на уступе. Это приводит к значительному перемещению рудных тел при взрыве, нарушению контактов и перемешиванию руд с вмещающими породами, а также переизмельчению рудной массы в окрестности заряда. Потери и разубоживание руд при данном способе взрывания относительно высоки: они достигают, по данным ряда исследователей, 20-40% всех видов потерь и разубоживания на карьерах. В связи с изложенным возникает настоятельная необходимость детального изучения комплекса производственных процессов в условиях разработки сложных месторождений с учетом геологических, физико-технических, организационных и экономических факторов и в первую очередь процесса взрывного разрушения скальных массивов.

Как показали наши исследования, техника и технология буровзрывных работ в условиях открытой разработки сложных месторождений должна обеспечивать: а) достижение заданных показателей качественного дробления руд и пород при компактном размещении горной массы на месте взрыва с целью получения заданной производительности погрузочно-транспортного оборудования и б) относительную сохранность рудных тел или рудоносных зон при минимальном перемешивании их на контактах с вмещающими породами в процессе дробления и перемещения массива взрывом с целью повышения

I

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР

качества добываемого рудного сырья и снижения его потерь на различных стадиях переработки. Необходимость изыскания методов качественного дробления в сочетании с наименьшим перемещением рудных и породных массивов является принципиально новым, присущим только подобным месторождениям требованием. Практическая ценность работ в этом направлении не вызывает сомнений, если учесть, что 62% запасов руд цветных и редких металлов в СССР заключено в сложных месторождениях, 92% которых сложено скальными массивами при средневзвешенном коэффициенте крепости руд и пород, равном 10.

Важное научное и народнохозяйственное значение проблемы в целом определило главное направление и цель исследований — изучение основных закономерностей разрушения и перемещения пород взрывом при отбойке рудных массивов в условиях открытой разработки сложных месторождений цветных и редких металлов. Начиная с 1954 г., автором систематически проводились научно-исследовательские и опытно-промышленные работы в данном направлении, краткое содержание которых изложено в настоящем автореферате.

Исследования выполнялись вначале в бывшем Московском институте цветных металлов и золота им. М. И. Калинина, а затем были продолжены в лабораториях Института физики и механики горных пород Академии наук Киргизской ССР. Опытно-промышленные работы и внедрение результатов лабораторных и производственных исследований выполнены автором в содружестве с инженерно-техническими коллективами Киргизского горно-металлургического комбината, Хайдарканского ртутного комбината, Киргизского горнорудного комбината, Алмалыкского ордена Ленина горно-металлургического комбината им. В. И. Ленина, Балхашского ордена Ленина горно-металлургического комбината им. 50-летия Октябрьской революции.

Автор глубоко признателен ныне покойному доктору технических наук Ф. А. Бауму, под руководством и при постоянной консультации которого были начаты работы. Ряд ценных замечаний, способствующих улучшению работы, был получен автором от академика Н. В. Мельникова, докт. техн. наук А. Н. Ханукаева, докт. техн. наук В. Н. Родионова, докт. физ.-мат. наук А. Н. Дремина, которым автор искренне благодарен.

Постановка экспериментальных исследований, внедрение их результатов в производство и проведение некоторых расчетов на электронно-вычислительных машинах были бы невозможны без творческого участия сотрудников руководимого автором отдела физики и

механики разрушения горных пород взрывом, которым также выражается глубокая благодарность.

## Глава I. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе приведены общие сведения о современном состоянии техники и технологии взрывной отбойки рудных массивов в условиях сложных месторождений и дан краткий анализ исследований, выполненных советскими и иностранными учеными в области разрушения горных пород взрывом (работы Н. В. Мельникова, Ф. А. Баума, Г. И. Покровского, А. Н. Ханукаева, Э. О. Мидели, В. Н. Родионова, Л. Н. Марченко, Е. И. Шемякина, Г. М. Ляхова, Г. П. Демидюка, М. Ф. Друкованного, Г. Кольского, И. Броберга, Р. Коула и др.).

Обобщение и анализ опыта разработки сложных месторождений цветных и редких металлов позволили вскрыть специфические особенности горных работ, которые отличают применяемую на этих месторождениях технологию взрывной отбойки скальных массивов от технологии, широко распространенной на карьерах других отраслей промышленности. В этих условиях необходимо строгое соблюдение соответствия применяемой технологии отбойки и выемки геоморфологическим особенностям рудных тел и залежей. Критерием проверки соответствия является уровень потерь и разубоживания, достигаемый при применении той или иной технологии буровзрывных работ. Экспериментальными исследованиями и экономическими расчетами (Б. П. Боголюбов, Б. П. Юматов, И. А. Тангаев, Ю. Н. Ермолин, Ф. Г. Грачев, Г. В. Секисов и др.) показано, что минимальные потери и разубоживание в случае отбойки рудных тел малой мощности могут быть достигнуты при меньших, чем это сейчас принято на карьерах, высотах уступов и диаметрах скважинных зарядов. Причем, независимо от существующих морфологических разновидностей рудных тел, наблюдается тенденция к снижению разубоживания и потерь с уменьшением высоты уступа и диаметра скважинных зарядов. Это снижение идет тем интенсивнее, чем меньше мощность рудного тела, поскольку резко сокращаются прихват пустых пород на контактах рудных тел с вмещающими породами и переизмельчение рудной массы в пределах ближней зоны действия взрыва.

В то же время в условиях разработки месторождений, представленных рудными телами весьма сложной формы при отсутствии четких

контактов и наличии резкой перемежаемости рудных включений и пустых пропластков, наиболее целесообразным является сохранение первоначальной геологической структуры массива, что обеспечит получение минимальных показателей потерь и разубоживания. Соблюдение данного требования связано с необходимостью минимального перемешивания руд и пород в процессе перемещения горной массы взрывом. Высота уступа и диаметр скважинных зарядов в данном случае не имеют доминирующего значения для качества добываемой рудной массы. Однако независимо от сложности разрабатываемых месторождений остается неизменным одно общее требование к технологии отбойки рудных массивов — обеспечение качественного дробления руд и пород при компактном размещении взорванной горной массы на месте взрыва.

Наметившиеся тенденции в изменении технологии буровзрывных работ при разработке сложных месторождений требуют принципиально иного, чем до сих пор, научно-методического подхода к изучению процессов дробления и перемещения массивов горных пород и выбору параметров массовых взрывов. Ранее выполненные в этом направлении работы Г.И.Покровского, А.Н. Ханукаева, Ф.И. Кучерявого, В.Н. Мосинец, М.Ф. Друкованного, Н.Г. Петрова и др. были направлены в основном на изучение закономерностей действия взрыва на сравнительно больших относительных расстояниях (более 10–25  $\tau_0$ ). Оценка результатов взрыва производилась, как правило, по гранулометрическому составу разрушенной массы без учета начальных параметров ударных волн на границе раздела заряд-среда и характера распределения энергии взрыва в процессе формирования ударных волн в массиве. Между тем, наиболее существенное изменение состояния среды и распределение потенциальной энергии взрыва во времени и пространстве происходит именно в ближней зоне. Следовательно, знание параметров ближней зоны совершенно необходимо для изучения особенностей процессов формирования и распространения волн в массиве горных пород и закономерностей его разрушения под действием ударных волн и продуктов детонации. В свою очередь, поведение пород в ближней зоне всецело будет зависеть от детонационных характеристик ВВ, размеров заряда и его плотности, условий и характера передачи давления и энергии на границе раздела заряд-среда и сжимаемости горных пород. В ранее проведенных экспериментально-теоретических исследованиях содержится очень мало сведений о взаимодействии взрывов при групповом взрывании зарядов и затухании давления и энергии волн сжатия на различных

расстояниях, что особенно важно при выборе и обосновании параметров отбойки рудных массивов скважинными зарядами. Процесс же перемещения разрушенных масс при различных методах взрывания и его кинематические параметры до сих пор не нашли должного освещения в специальной литературе.

Изложенное выше и послужило основой для выбора цели и задач исследований, результаты которых нашли отражение в настоящей диссертации. В соответствии с поставленной целью определились задачи исследований:

1. Изучение основных закономерностей формирования и распространения взрывных волн, вызывающих предразрушение массива горных пород при взрыве единичного заряда, и их взаимодействия при взрыве групповых зарядов.

2. Исследование основных закономерностей процесса перемещения разрушенного массива горных пород под действием расширяющихся продуктов детонации.

3. Обоснование методов управления и параметров процесса отбойки сложных рудных тел и их проверка в промышленных условиях.

При решении перечисленных задач в работе использованы методы аналитических исследований и статистического анализа, методы лабораторных экспериментов с использованием радиоэлектронной и оптической аппаратуры, электромагнитных установок, натурные наблюдения за процессами и экспериментальные исследования в производственных условиях, технико-экономический анализ и расчеты.

## Глава II. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

В отличие от известных методов (Ф.А.Баума, А.Н.Ханукаева, Н.Н.Казакова и др.) оценки распределения потенциальной энергии взрыва при взаимодействии детонирующего заряда с окружающей его средой по остаточной энергии расширяющихся продуктов детонации, в работе предложена вычислительная схема, основанная на определении энергии ударной волны, генерируемой продуктами взрыва в среде.

Схемой предусматривались определенная модель взаимодействия продуктов детонации и твердой среды и ряд допущений, которые заключались в следующем. Поскольку прочность горных пород значи-

тельно ниже развиваемого на границе раздела заряд-среда давления, порода рассматривалась как упругое квазизидкое тело. Ввиду отсутствия обобщенного уравнения состояния горных пород в работе использовано уравнение ударной сжимаемости вида

$$p = \frac{p_0 c_p}{n} \left[ \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^n - 1 \right], \quad (I)$$

где  $p$  - давление;

$p_0, p_1$  - начальная плотность вещества и плотность после нагружения давлением  $p$ ;

$c_p$  - скорость звука в среде;

$n$  - постоянная величина, принятая в соответствии с исследованиями Ф.А.Баума и М.А.Бержеца равной 4.

Адиабата расширения продуктов детонации принята в виде

$$p = B p^K,$$

где  $p$  - давление;

$B$  - постоянная величина;

$p_1$  - удельная плотность продуктов взрыва;

$K$  - показатель адиабаты расширения. Согласно исследованиям Н.М.Кузнецова и К.К.Шведова, показатель степени принят независимым от давления (в рассматриваемом диапазоне изменения давления) и постоянным для каждого ВВ.

В результате расчетов установлены начальные параметры ударных волн на границе раздела заряд-порода в условиях нагружения нормально падающей и скользящей детонационной волной (детонация скважинного заряда); определены энергия ударной волны и коэффициент передачи энергии в волну от детонирующего заряда для различных сочетаний пород и взрывчатых веществ в условиях детонации скважинного заряда; дана приближенная оценка необратимых потерь энергии в ближней зоне для конкретных условий взрывания.

Основным условием, позволяющим рассчитать параметры ударных волн в начальный момент, является условие непрерывности массовой скорости и давления на границе заряд-среда. От поверхности разрушаемой среды может отражаться либо ударная волна, либо волна разрежения. При этом скорость частиц среды за фронтом ударной волны в начальный момент может быть определена из уравнения

$$u_1 = \sqrt{(p_1 - p_0)(V_0 - V_1)},$$

где  $p_0$  и  $p_1$  - давление перед фронтом и во фронте волны соответственно;

$V_0$  и  $V_1$  - удельный объем среды перед фронтом и за фронтом волны.

Учитывая выражение (I) и принимая  $p_0 = 0$ , получим

$$u_1 = \sqrt{\frac{p_1}{p_0} \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{p_1}{A}\right)^{1/n}} \right]}, \quad (2)$$

где

$$A = \frac{p_0 c_p}{n}.$$

Рассмотрим два типа разрывов при нагружении среды нормально падающей детонационной волной.

С л у ч а й I. От поверхности разрушаемой среды отражается ударная волна, т.е.  $p_1 > p_H$ , где  $p_H$  - давление за фронтом детонационной волны в плоскости Чепмена-Жуге.

Движение граничной поверхности выражается условием

$$u_1 = u_H - u'_1, \quad (3)$$

где  $u_H$  и  $u'_1$  - скорость частиц за фронтом соответственно детонационной и отраженной ударной волн.

Исходя из условия (3) и привлекая уравнение (2), после соответствующих преобразований получим равенство

$$\sqrt{\frac{p_1}{p_0} \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{p_1}{A}\right)^{1/n}} \right]} = \frac{D_H}{K+1} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_H} - 1 \right) \sqrt{\frac{2Kp_H}{(K+1)p_1 + (K-1)p_H}} \right]. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой условие равенства давления и массовой скорости для продуктов детонации и среды.

С л у ч а й II. От поверхности разрушаемой среды отражается волна разрежения, т.е.  $p_1 < p_H$ . Движение граничной поверхности в этом случае будет выражаться условием

$$u_1 = u_H + u'_1, \quad (5)$$

где  $u'_1$  - скорость волны разрежения.

Учитывая условие (5), получим равенство

$$\sqrt{\frac{p_1}{p_0} \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{p_1}{A}\right)^{1/n}} \right]} = \frac{2KD_H}{K^2-1} \left\{ 1 + \frac{2}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_H} \right)^{\frac{K-1}{2K}} \right] \right\}. \quad (6)$$

Найденные по уравнению (6) методом последовательных приближений расчетные значения давлений (расчеты выполнены на электронно-вычислительной машине "Минск-22") оказались в удовлетворительном согласии с величинами давлений на границе раздела заряд-среда,

определенными графическим построением (методом отражения) по экспериментальным ударным адиабатам (табл. I).

Т а б л и ц а I

Горные породы	Давление на границе, $10^5$ кг/см <sup>2</sup> при взрыве		
	аммонита 6ЖВ (при $d \rightarrow \infty$ )	аммонита ск. I (при $d = 100$ мм)	аммонала ВА-4 (при $d = 100$ мм)
Дунит	1,45 <sup>х</sup> )	1,44	1,26
	1,49 <sup>хх</sup> )	1,41	1,19
Бронзитит	1,43	1,53	1,35
	1,35	1,46	1,25
Диабаз	1,38	1,48	1,28
	1,30	1,40	1,20
Эклогит	1,36	1,45	1,26
	1,38	1,49	1,27
Гранит	1,30	1,39	1,21
	1,26	1,20	1,22
Известняк	1,03	1,11	0,97
	1,02	1,09	0,91
Глинистый алеврит	0,82	0,81	0,68
	0,92	0,89	0,75

х) Численное решение.

хх) Графическое решение.

В отличие от рассмотренной схемы (случай I и II) при взрыве скважинного заряда нагружение среды происходит скользящим по стенке скважины фронтом детонационной волны. Предполагается, что фронт волны плоский и перпендикулярен к образующей скважины. В этих условиях от границы раздела заряд-среда отражается только волна разрежения, обусловленная сжимаемостью среды и тем, что вектор массовой скорости  $\bar{u}_n$ , нормальный к образующей скважины в начальный момент, равен нулю.

Исходя из условия (5), где  $u_n = 0$ , и учитывая уравнения (3) и (6), получим равенство

$$\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0} \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_0}\right)^{1/2k}} \right]} = \frac{2k D_n}{k^2 - 1} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_1}{\rho_n} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]. \quad (7)$$

Таким образом, численным методом из уравнений (2) и (7) могут быть определены давление  $p$ , и массовая скорость  $u$ , на границе раздела при нагружении ее скользящей детонационной волной.

В работе дан детальный анализ движения среды и определена энергия ударной волны в условиях детонации скважинного заряда. Взаимодействие продуктов детонации с горными породами рассмотрено на примере области нагружения, ограниченной двумя плоскостями, перпендикулярными оси симметрии. Заряд ВВ достаточно удален от свободной поверхности, чтобы исключить влияние последней на процесс взаимодействия. В процессе движения границы раздела вокруг детонирующего заряда образуется слой сжатой среды, который служит своего рода связью между фронтом волны и границей раздела. Поскольку в начальный момент взаимодействия плотность этого слоя в условиях ударного сжатия будет выше начальной плотности среды, создаются благоприятные условия для "подпитывания" ударной волны от источника энергии - детонирующего заряда. В этом случае любое возмущение от источника догоняет фронт, так как для ударных переходов справедливо соотношение  $D < u + c$ .

Предположим также, что плотность среды во фронте волны и на границе раздела одинакова и зависит только от давления во взрывной полости.

Главным в выборе путей приближенного решения сформулированной задачи является принятие исходных предпосылок, позволяющих объяснить механизмы передачи энергии от заряда среде.

Согласно принятому механизму формирования ударных волн на границе раздела, под энергией ударной волны следует понимать ту часть общей энергии ВВ, которая успевает перейти в среду (в виде кинетической энергии движения и потенциальной энергии сжатия) при взрыве цилиндрического заряда до момента начала разрушения поверхностного слоя взрывной полости. В рассматриваемой задаче возмущенное вещество представляет собой область среды, заключенной между фронтом ударной волны и контактной поверхностью. Условимся называть эту область ударносжатым слоем. Определим критические расстояния, на которых появляются трещины в поверхностном ударносжатом слое вокруг скважины. В условиях статического нагружения разрушение практически начинается с начального радиуса. При динамическом же нагружении за счет сжимаемости среды в слое, прилегающем к заряду ВВ, возникает некоторый "запас для растягивания" этого слоя. Пусть  $\frac{\rho_0}{2\pi r_0}$  - начальная постоянная системы,

тогда  $\frac{\rho_1 - \rho_0}{2\pi\tau_{кр} - 2\pi\tau_0}$  есть запас уплотнения, который позволяет стенке скважины расширяться некоторое время без разрыва сплошности. При этом обязательным условием является допущение, что адиабата нагружения и изэнтропа расширения ударносжатого вещества совпадают.

Примем также, что трещины в слое появляются с того момента, как только выполнится условие

$$\frac{\rho_1 - \rho_0}{2\pi\tau_{кр} - 2\pi\tau_0} = \frac{\rho_0}{2\pi\tau_0},$$

где  $\tau_{кр}$  - критический радиус, начиная с которого в слое появляются трещины.

Отсюда 
$$\bar{\tau}_{кр} = \frac{\tau_{кр}}{\tau_0} = \frac{\rho_1}{\rho_0}.$$

Тогда по уравнению (I) можно рассчитать приближенно (так как расширение по двум изэнтропам -  $\rho V^k$  и  $\rho V^{\delta}$  - заменяется расширением по одной, первой) соответствующее  $\tau_{кр}$  давление в полости. Анализ расчетных данных показал, что условия взаимодействия слабых ВВ с прочными породами приближаются к условиям квазистатического расширения. Так, например, в сочетании аммонит БЖВ-гранит трещины за пределами  $\tau_{кр}$  появляются раньше, чем давление во взрывной полости успевает упасть до значения  $\rho_1$ . В то же время в сочетании аммонит БЖВ-глинистый алевроит критический радиус имеет в 2 раза большее значение, чем в первом случае, что обусловлено большей сжимаемостью глинистого алевроита.

На основании закона сохранения масс для цилиндрической симметрии связь между радиусом фронта волны  $R$  и радиусом расширения полости  $\tau$  имеет вид:

$$R = \left( \frac{\rho_1 \tau_1^2 - \rho_0 \tau_0^2}{\rho_1 - \rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Определенные согласно приведенной схеме параметры движения среды за фронтом ударной волны с учетом предполагаемого механизма передачи энергии на границе раздела позволили также рассчитать для каждого конкретного случая сочетаний ВВ - горная порода количественное выражение энергии и произвести сравнительную оценку.

Полная энергия, приобретенная 1 г невозмущенной среды, согласно исследованиям Я.Б.Зельдовича и Ю.П.Райзера, равна

$$E_1 = \rho_1 (V_0 - V_1).$$

Считая, как и прежде, что ударные волны в горных породах, вызываемые взрывом промышленных ВВ, слабые, примем, что ударная адиабата сжатия совпадает с изэнтропией расширения. При этом геометрическая интерпретация механизма ударного сжатия вещества упростится. Энергия ВВ в элементарном объеме (по Я.Б.Зельдовичу и А.С.Компанейцу)

$$E_{ВВ} = \pi\tau_0 k \rho_{ВВ} \left[ Q_V \cdot 427 + \frac{D^2}{\kappa^2 - 1} \right].$$

Энергия ударной волны

$$E_{уг} = E_k + E_{вн},$$

где  $E_k$  - кинетическая энергия среды, ограниченной поверхностью раздела и фронтом ударной волны;

$E_{вн}$  - энергия внутреннего сжатия среды, охваченной ударной волной.

Кинетическая энергия среды

$$E_k = \frac{m_c u_1^2}{2}, \quad (8)$$

где  $m_c$  - масса возмущенной среды;

$$m_c = \pi k \rho_0 (R_1 - \tau_0). \quad (9)$$

Потенциальная энергия для той же массы среды

$$E_{вн} = \frac{\rho}{2} (V_0 - V_1). \quad (10)$$

Таким образом, энергия ударной волны с учетом выражений (8), (9) и (10)

$$E_{уг} = \pi k \rho_0 (R_1 - \tau_0) \left[ \frac{1}{2} \rho_1 (V_0 - V_1) + \frac{u_1^2}{2} \right].$$

Энергия упругого сжатия

$$E_{сж} = m_c \left[ - \int_{V_0}^{V_1} (\rho dV)_{\rho=\rho_0} \right] = m_c \int_{\rho_0}^{\rho_1} \rho \frac{d\rho}{\rho^2}.$$

После интегрирования получим

$$E_{сж} = m_c \frac{\rho_0 \rho_1^2}{\rho} \left[ \frac{\rho_0}{\rho_1} + \frac{1}{n+1} \left( \frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{n-1} - \frac{n}{n-1} \right].$$

Тогда необратимые потери энергии, обусловленные переходом вещества через фронт ударной волны, могут быть определены как разность между энергией внутреннего и энергией упругого сжатия:

$$E_n = E_{вн} - E_{сж}. \quad (11)$$

Приближенная оценка потерь энергии в ближней зоне произведена на основании уравнения (II). Результаты расчетов показали, что величина потерь энергии в основном зависит от развиваемого на границе раздела давления и способности среды сжиматься под действием динамических нагрузок. Практически, например при одинаковом давлении на границе раздела, потери энергии при взрыве заряда одного и того же ВВ (заряд аммонита 6ЖВ диаметром 100 мм с  $E_{ВВ} = 5570$  кГм) в глинистом алевролите оказались почти в 3,5 раза выше, чем в известняке, в 18 раз больше, чем в мраморе (табл. 2). Именно это обстоятельство и обуславливает быстрое затухание энергии ударной волны в сильно сжимаемых средах.

Т а б л и ц а 2

Горные породы	Общая энергия, переданная УВ, кГм	Энергия, переданная УВ за критическим радиусом, кГм	Потери энергии в сжатом слое, кГм	Энергия в продуктах детонации, кГм
Мрамор	1109	880	229	4459
Известняк	2433	1312	1121	3135
Глинистый алевролит	4997	1002	3995	573

Результаты расчетов и их анализ позволили сделать некоторые выводы, развивающие в конечном итоге сформулированную ранее гипотезу формирования ударных волн и передачи энергии взрыва на границе раздела заряд-среда:

1. Энергия ударной волны определяется свойствами взрывчатых веществ и горных пород в каждом конкретном случае их сочетаний при взаимодействии.

2. Способность среды к восприятию энергии взрыва в основном определяется величиной сжимаемости среды  $-\frac{\rho_1}{\rho_0}$ . С увеличением сжимаемости среды доля энергии, переходящая от источника взрыва в ударную волну, увеличивается, достигая максимальных значений для мягких, сильно пористых и трещиноватых пород, наоборот, с уменьшением сжимаемости пород эта доля резко уменьшается. В то же время потери энергии в ближней зоне достигают наибольших величин именно в мягких породах за счет увеличения тепловых потерь, обусловленных высокой сжимаемостью нагружаемого материала.

3. В условиях детонации скважинных зарядов способность системы ВВ-среда к передаче энергии в ударную волну характеризуется для каждого ВВ кривой в координатах  $E - \frac{\rho_1}{\rho_0}$  или  $E - \bar{z}_i$  с обязательным экстремальным участком. Это означает, что существует такое значение  $\frac{\rho_1}{\rho_0}$ , при котором в среду от заряда ВВ с заданными свойствами будет переходить максимально возможное для данного ВВ количество энергии в форме ударной волны. Аналитически это выражается условием

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \left( \frac{K}{K-1} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $K$  — показатель политропы расширения продуктов детонации данного ВВ.

4. Максимально возможная для данного ВВ энергия, передаваемая ударной волне и определяемая как

$$E_{УВ\max} = \pi \chi_0^2 h \frac{\rho_{ВВ} D_{и}}{K^2 - 1} \left( \frac{K-1}{K} \right)^2, \quad (I2)$$

зависит, как видно из формулы (I2), от начального диаметра заряда и его высоты, плотности ВВ и показателя политропы. Их комплексное влияние может быть детально изучено только экспериментальным путем.

Параметры ударных волн с достаточной для практических целей точностью могут быть рассчитаны по приведенной выше методике. Анализ расчетных данных показал, что абсолютные значения этих параметров обусловлены комплексной взаимосвязью параметров детонационных волн и реакций нагружаемой системы, т.е. способностью пород быстро или медленно передавать энергию взрыва в ударную волну. Последнее однозначно зависит от диссипативных потерь в ближней зоне.

В целях проверки основных положений методики расчета начальных параметров ударных волн и уточнения ряда исходных показателей были замерены<sup>х)</sup> параметры детонационных волн наиболее представительных промышленных ВВ: тротил, аммонит 6ЖВ, аммонит скальный № I, аммонал ВА-4. Затем по известным ударным адиабатам продуктов детонации и ударным адиабатам горных пород были определены истинные значения начальных параметров ударных

х) Исследования выполнены электромагнитным методом в Филиале Института химической физики АН СССР.



волн на границе раздела заряд-среда и произведено их сравнение с расчетными данными (см. табл. I). Исследованиями установлено, что перечисленные параметры зависят от размеров заряда и его формы, плотности ВВ и прочности оболочки, окружающей детонирующий заряд. Давление во фронте и скорость движения фронта детонационных волн с увеличением диаметра заряда, плотности ВВ и прочности оболочки возрастают до определенного предела, после чего дальнейшее их увеличение не оказывает существенного влияния на параметры детонации. Это объясняется уменьшением потерь в зоне химической реакции, вызванных возникновением волн бокового разрежения. Изменение же массовой скорости за фронтом детонационной волны  $u_n$  подчиняется иной зависимости. Если при увеличении диаметра заряда  $u_n$  возрастает так же, как и остальные параметры ( $\rho_n, D_n$ ), то при повышении плотности ВВ значение  $u_n$  падает. Показатель политропы продуктов детонации с увеличением плотности ВВ возрастает. При увеличении диаметра заряда свыше критического значения показатель политропы остается неизменным, а ниже критического — увеличивается. Во всех случаях испытаний аммиачно-селитренных ВВ показатель политропы при диаметрах зарядов свыше 80 мм колеблется в пределах 1,6–2,4.

Экспериментальные исследования начальных параметров ударных волн ( $\rho, u, p_i, \gamma, E$ ) и закономерностей их изменения в процессе распространения волн выполнены на образцах и в массивах горных пород как в лабораторных, так и в полигонных условиях. При этом в качестве комплексного параметра, учитывающего пластические и вязкие потери при распространении волн, вызванные различием в физических свойствах нагружаемого материала, принят показатель поглощения энергии — показатель затухания. Замер параметров ударных волн и волн напряжения на различных относительных расстояниях от заряда производили двумя способами:

— при изучении динамических параметров среды и волновых процессов в ближней зоне взрыва ( $\gamma \leq 10$ ) — электромагнитным методом;

— при изучении динамических параметров среды и волновых процессов в дальней зоне взрыва ( $\gamma \leq 20$ ) — путем тензометрических измерений давления, а также времени существования положительной фазы волны напряжений и скорости смещения с помощью датчиков.

Ошибка измерений параметров ударных волн с помощью электромагнитного метода в условиях опытов не превышала 1,5%. При тензо-

метрических измерениях эта ошибка колебалась в пределах 3,5–10% при коэффициенте вариации 7,2–13,4%.

Исследования особенностей распространения и затухания ударных волн и волн напряжения выполнены в глинистых алевролитах, пористых известняках и мраморе, характеристика которых приведена в табл. 3. Указанные среды ведут себя существенно различно при ударном сжатии. Кроме того, в условиях сложных месторождений массивы вмещающих пород чаще всего представлены именно этими и подобными им породами, а заполнителями трещин являются, как правило, глинистые породы. Поэтому их выбрали в качестве объектов исследований с тем, чтобы наиболее полно охарактеризовать как особенности распространения ударных волн, так и энергоемкость сред в процессе нагружения их взрывом.

Т а б л и ц а 3

Порода	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность на одноосное сжатие, кг/см <sup>2</sup>	Скорость продольной волны, м/сек	Скорость поперечной волны, м/сек	Акустическая жесткость, $\frac{10^6 \text{ кг.м}}{\text{м}^3 \cdot \text{сек}}$	Коэффициент Пуассона
Глинистый алевролит	1,77	10,5	147	77	0,26	0,31
Известняк	2,40	266,0	2900	1640	6,96	0,25
Мрамор	2,70	500,0	3970	2350	10,7	0,23

Согласно данным о минералогическом составе, наличии воздуха и воды, глинистые алевролиты отнесены к группе многокомпонентных неводонасыщенных глинистых пород (твердый компонент — песчаная и глинистая фракции — 58–60%, пористость 30% и влажность 10–12%). Известняки рассматривали как двухкомпонентные среды, поскольку твердый компонент составил в них 86%, пористость — 13,7%, а влажность — всего лишь 0,3%. Мрамор был отнесен к однокомпонентной среде (пористость 1,1%, а влажность 0,03%).

Эксперименты показали, что наиболее интенсивное изменение давления и наибольшие деформации в условиях глинистых пород наблюдаются в ближней зоне:  $\bar{R} \approx 2$ . Так, например, при  $\bar{R} = 1,38$  давление во фронте сферической волны упало с  $60,5 \cdot 10^3$  (на контакте) до  $8,0 \cdot 10^3$  кг/см<sup>2</sup>, а глинистый алевролит из состояния с начальным удельным объемом  $V_0 = 0,565$  см<sup>3</sup>/г скачкообразно перешел в со-

стояние, характеризующееся удельным объемом  $V_i = 0,398 \text{ см}^3/\text{г}$  (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Относительное расстояние $\bar{r}$	Давление (напряжение) $\rho \cdot 10^{-3}, \text{ кг/см}^2$	Текущий удельный объем $V_i, \text{ см}^3/\text{г}$	Объемная деформация $\epsilon$
<u>Сферический заряд</u>			
1,00	60,5	0,314	0,444
1,38	8,0	0,398	0,290
1,53	5,7	0,425	0,260
1,96	2,9	0,452	0,200
2,49	1,6	0,483	0,140
3,06	0,8	0,510	0,097
3,47	0,6	0,518	0,083
4,45	0,3	0,538	0,048
<u>Цилиндрический заряд</u>			
1,00	67,7	0,312	0,447
1,27	30,9	0,338	0,400
1,80	10,5	0,385	0,318
2,30	5,4	0,418	0,265
2,95	3,5	0,442	0,217
3,34	2,6	0,457	0,190
4,35	1,4	0,490	0,133
<u>Плоский фронт</u>			
1,00	88,7	0,305	0,460
1,97	79,6	0,308	0,455
3,01	61,6	0,314	0,442
5,02	28,3	0,340	0,398
6,01	19,4	0,356	0,370

При этом объемная деформация  $\frac{V_0 - V_i}{V_0}$  составила 0,29, что находится в полном соответствии с величиной начальной пористости глинистого алевролита, равной 30%, или  $0,3 V_0$ . Аналогичное явление замечено и во фронте цилиндрической волны. Этот факт еще раз подтвердил результаты исследований Г.М.Ляхова о том, что неводонасыщенные глинистые породы и подобные им грунты ведут себя как трехкомпонентные среды. При нагружении таких пород давлениями

свыше  $10^4 \text{ кг/см}^2$  происходит их уплотнение за счет закрытия пор, имеющих в составе пород; газообразный и жидкий компоненты вследствие сжатия во фронте ударной волны стремятся занять ничтожно малый объем по сравнению с объемом твердого компонента. Значит, в условиях высоких давлений роль твердого компонента будет определяющей в поведении сред, подобных неводонасыщенным грунтам (в водонасыщенных грунтах при высоких давлениях определяющим является жидкий компонент). На основании экспериментальных исследований можно также утверждать, что при взрывании многокомпонентных неводонасыщенных сред (грунты, сильно пористые и трещиноватые скальные породы) тепловые потери во фронте ударной волны будут тем больше, чем при меньших диапазонах давлений будут нагружаться среды, чем выше будет их пористость и трещиноватость, чем меньше прочность скелета разрушаемых сред и цементирующего состава. С повышением прочности и монолитности пород или прочности цементирующего состава тепловые потери будут падать, а потери на упругое сжатие возрастать. Эти выводы полностью подтверждают результаты ранее приведенных теоретических исследований.

Рассмотрение состояния и поведения глинистого алевролита при нагружении его давлениями ниже  $10^4 \text{ кг/см}^2$  (что соответствует относительному расстоянию более 1,5-1,8  $\tau_0$ ) показало, что эта область характеризуется значительными относительными деформациями (от  $3,5 \cdot 10^{-2}$  до  $1,0 \cdot 10^{-2}$ ) и более плавным, но все же еще интенсивным затуханием давления и энергии с расстоянием. Природу деформаций, а также процесс затухания энергии в этой области можно объяснить исходя из следующих соображений. Необратимые тепловые потери энергии вызвали резкое падение давления в приконтактной зоне. Это падение привело к перераспределению долевого участия компонентов среды в сопротивляемости сжатию. Если ранее в начальном сечении основное доленое участие в сопротивляемости среды сжатию принадлежало твердому компоненту и его скелету - кварцу, то в области средних давлений доленое участие твердого и жидкого компонентов начинает выравниваться. Однако по-прежнему определяющей в целом является сжимаемость твердого компонента. В то же время, несмотря на, казалось бы, полное закрытие пор, все еще имеют место значительные изменения  $V_0 - V_i$ . Подобное поведение глинистого алевролита объясняется минералогическим составом твердого компонента.

Дальнейшее уменьшение давления приводит к состоянию среды, характеризующемуся упругим поведением ее при нагружении.

Анализ результатов исследований показал, что процесс затухания ударных волн и волн напряжений в разных областях нагружений не одинаков. Аппроксимация экспериментальных зависимостей  $\rho(\bar{R})$  позволила установить следующие показатели затухания в глинистом алевролите (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Форма зарядов	Показатель затухания		
	при относительных расстояниях $\bar{R} = \frac{r_i}{r_0}$		
	до 1,5	1,5-15	25
Сферическая	3,9	3,13	1,47
Цилиндрическая	2,65	-	0,81

Показатель затухания давления и энергии позволяет рассчитать при известных начальных параметрах ударных волн параметры волн напряжения в разных точках массива, расположенных на различных расстояниях от центра взрыва, по формуле вида

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{\rho_1}{\bar{R}^m} \quad (13)$$

В формуле (13) начальное давление  $\rho_1$  на границе раздела заряд-среда определяется либо расчетным путем, либо графическим методом по известным адиабатам горных пород. Зная значение  $\rho_1$  при различных сочетаниях порода-ВВ, а также показатель затухания  $m$  в ближней зоне и далее, легко установить, с достаточной для практики точностью, значения максимальных (радиальных) напряжений  $\bar{\sigma}_r$  при любых относительных расстояниях  $\bar{R}$ .

Наличие трех значений показателя затухания для сферических зарядов и двух для цилиндрических (см. табл. 5) подтверждает ранее высказанное нами предположение о том, что породы многокомпонентного состава (грунты, сильно пористые и трещиноватые неводонасыщенные массивы) в процессе нагружения значительно изменяют свое первоначальное состояние.

Результаты исследований закономерностей деформирования известняка в ближней зоне ( $V_0 = 0,417 \text{ см}^3/\text{г}$ ) приведены в табл. 6.

При давлениях, соответствующих фазовому превращению известняка, в случае нагружения сферической (аналогично цилиндрической) волной четко прослеживаются две области нагружения: интенсивного сжатия с резким изменением удельного объема (с  $0,417 \text{ см}^3/\text{г}$  до  $0,319 \text{ см}^3/\text{г}$  при увеличении давления до  $43 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ ) и интен-

сивного сжатия с плавным и незначительным изменением удельного объема (удельный объем составил  $0,315$ , т.е. изменился лишь на  $0,04 \text{ см}^3/\text{г}$  при увеличении давления с  $43 \cdot 10^3$  до  $156 \cdot 10^3$ ).

Т а б л и ц а 6

Относительное расстояние $\bar{R}$	Давление (напряжения) $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/см <sup>2</sup>	Текущий удельный объем $V_i$ , см <sup>3</sup> /г	Объемная деформация $\epsilon$
<u>Сферический заряд</u>			
1,00	79,7	0,302	0,276
1,25	24,7	0,338	0,190
1,51	12,2	0,361	0,110
2,03	5,3	0,383	0,081
2,72	3,0	0,395	0,053
3,72	1,1	0,408	0,020
<u>Цилиндрический заряд</u>			
1,00	83,9	0,300	0,280
1,25	40,6	0,323	0,225
1,63	18,1	0,348	0,141
2,05	9,4	0,368	0,117
2,62	4,9	0,385	0,076
3,75	2,1	0,400	0,040
<u>Плоский фронт</u>			
1,00	111,4	0,292	0,300
2,06	102,9	0,295	0,292
3,00	91,9	0,299	0,283
4,25	78,6	0,302	0,276

Такое поведение известняка в условиях ударного сжатия объясняется прежде всего его минералогическим составом. Действительно, согласно данным о минералогическом составе известняка, последний рассматривался как двухкомпонентная среда, состоящая из твердого и газообразного компонентов различной сжимаемости. В связи с этим различно и долевое участие их в изменении объема при разовом воздействии тех или иных давлений. Так, при давлениях менее  $12 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$  изменение объема  $\frac{V_0 - V_i}{V_0}$  составляет величину, соответствующую объему пор при нормальных условиях ( $\sim 14\%$ ).

Очевидно, что в области давлений до  $12 \cdot 10^3$  кг/см<sup>2</sup> изменение объема в ударной волне происходит за счет сжатия газообразного компонента, наличие которого предопределяет также и сжатие твердого компонента. Полное или частичное закрытие пор в рассматриваемом диапазоне давлений при разовом динамическом нагружении сопровождается сокращением расстояний между порами, что и ведет к увеличению плотности среды. При этом в силу различной сжимаемости составляющих компонентов сопротивление сжатию оказывает преимущественно твердый компонент. В дальнейшем с повышением давления ( $\sim 12 \cdot 10^3$  кг/см<sup>2</sup>) изменение объема  $V_0 - V_i$  происходит в основном за счет твердого компонента, а процесс сжатия сопровождается нарушением цементирующих составляющих, разрывом (частичным или полным) межкристаллических связей, преодолением сцепления между частицами. Этому в значительной мере способствует также наличие в материале различного рода дефектов.

Анализ экспериментальных исследований показал, что в пористом известняке, как и в глинистых алевролитах, затухания давления и энергии при распространении волн в ближней и дальней зонах существенно различны, что объясняется поведением известняка в условиях динамического сжатия как двухкомпонентной среды. Аппроксимация кривых зависимости  $\rho(\bar{R})$  позволяет установить показатель затухания для данных пород в различных зонах нагружения, а именно:

для зарядов сферической формы

$$\text{при } \bar{R} = 1 \div 5 \quad \rho = \frac{57,4 \cdot 10^3}{\bar{R}^{3,02}};$$

$$\text{при } \bar{R} > 60 \quad \sigma_{\chi \max} = \frac{2,35 \cdot 10^3}{\bar{R}^{1,64}};$$

для зарядов цилиндрической формы

$$\text{при } \bar{R} = 1 \div 5 \quad \rho = \frac{77,3 \cdot 10^3}{\bar{R}^{2,82}}.$$

При изучении ударной сжимаемости мрамора исследовалась его разновидность, близкая по своим физико-механическим свойствам к мрамору, исследованному А.Н.Дреминым. Характер полученной в экспериментах зависимости деформации от давления показал, что мрамор ведет себя как однокомпонентная среда, поведение которой при динамическом сжатии определяется поведением твердого ком-

понента. Кривые затухания сферических волн в ближней зоне ( $\bar{R} = 1 \div 1,5$ ) при распространении их в мраморе, согласно данным А.Н.Дремина, аппроксимированы уравнением

$$\sigma_{\chi \max} = \frac{191 \cdot 10^3}{\bar{R}^{2,81}}.$$

На основе выполненных экспериментальных исследований дана общая оценка процесса распространения и затухания волн в изучаемых породах для различных областей нагружения. Во всех опытах четко прослеживались три качественно и количественно отличающихся друг от друга области распространения волн. Приведенные в работе результаты измерений в достаточной степени отражают природу протекающего в среде волнового процесса и позволяют судить об особенностях изменения параметров волн с расстоянием и характере деформации среды в ближней зоне. Они полностью согласуются с исследованиями В.В.Адушкина и А.П.Сухотина, Ф.А.Баума и М.А.Бержеца, А.Н.Ханукаева, А.Н.Дремина и показывают, что закономерности затухания параметров волн с расстоянием, установленные для испытываемых пород, являются общими для всех пород, независимо от их физического состояния, прочностных и деформационных характеристик.

Так, при динамическом нагружении скальных горных пород сферическими и цилиндрическими волнами наблюдается интенсивное затухание ударных волн в ближней зоне; показатели затухания при этом колеблются в пределах двух-трех. В неводонасыщенных грунтах, характеризующихся значительной сжимаемостью, наблюдаются наибольшие показатели затухания, а именно 3,13 и 3,9. Это и отличает поведение скальных пород от грунтов в начальной стадии ударного их сжатия, что было показано ранее при теоретических расчетах. В области упруго-пластических деформаций, в которой имеет место незначительное уплотнение материала с последующим прогрессивным развитием радиальных и кольцевых трещин разрывного характера, показатель затухания не превышает двух. Из анализа также следует, что породы, характеризующиеся высокой прочностью (гранит, мрамор), при высоких скоростях нагружения и больших давлениях (сотни килобар) ведут себя как хрупкие тела. Здесь преобладающим является хрупкое разрушение. Наоборот, неводонасыщенные грунты, сильно пористые и трещиноватые породы, при нагружении ведут себя как пластичные тела. Пластичное разрушение будет тем более представительным, чем выше сжимаемость материала ( $\frac{\rho_i}{\rho_0}$ ).

Знание начальных параметров ударных волн на границе раздела заряд-среда и показателей затухания давления и энергии для различных областей нагружения позволяет рассчитать радиусы разрушения при разных диаметрах зарядов.

Приведенные методические положения были использованы при определении рациональных параметров взрывной отбойки рудных тел и рудоносных зон в условиях сложных месторождений, а также при оценке эффекта взаимодействия взрывов двух смежных зарядов ВВ.

### Глава III. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДОВ ВВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ИХ ВЗРЫВАНИЯ

Аналитическое решение задачи о взаимодействии зарядов ВВ при различных схемах их взрывания в массивах горных пород представляет известные трудности из-за отсутствия модели процесса. В работе задача решена экспериментальным методом. Рассмотрен простейший случай взаимодействия двух зарядов, поскольку любая схема группового взрывания на практике имеет в своей основе сочетание двух зарядов ВВ в ряду или двух рядов при мгновенном взрывании и т.д. При этом изучалась физическая картина механизма взаимодействия волн напряжения, возникающих в массиве горных пород при взрыве двух зарядов и различных интервалах времени замедления; определялось время взаимодействия волн напряжения, возникающих в массиве горных пород при взрыве двух зарядов и различных интервалах времени замедления, а также взаимодействия волн напряжения, при которых устанавливалось оптимальное распределение напряжений и деформаций в пределах объема разрушения.

Общую картину процесса и параметры взаимодействующих волн изучали на некотором фиксированном расстоянии от зарядов с помощью тензодатчиков давления и датчиков скорости смещения. Опытные работы выполнены в условиях ранее изученных пород — глинистых алевроитов и известняков — по схемам, обеспечивающим взаимодействие волн в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а именно вдоль ряда зарядов (первая схема) и по оси симметрии между зарядами (вторая схема). В обоих случаях взрывали заряды одного и того же ВВ, одинаковой формы (сосредоточенные), равных размеров (диаметр 60 и 120 мм) и веса. Взрывание производили от

специального задающего устройства (напряжение подрыва 6 кв), а время замедления контролировали с помощью счетно-импульсного хронометра.

Работы выполнялись в такой последовательности: сначала снимался профиль волны напряжения при взрыве одиночных зарядов, затем двух зарядов, взаимодействующих при мгновенном и короткозамедленном взрывании. Интервал замедления при исследованиях по первой схеме изменяли в пределах от  $t_n$  до  $\tau_{np}$ . Время  $t_n$  принимали, исходя из условия  $t_n = a/c_p$ , где  $a$  — расстояние между скважинами, м;  $c_p$  — скорость продольной составляющей волны напряжения, м/сек. За время  $\tau_{np}$  брали интервал замедления, длительность которого была значительно больше длительности положительной фазы волны сжатия  $t_{сж}$ , т.е.  $\tau_{np} \gg \frac{\lambda+a}{c_p}$  ( $\lambda$  — длина волны, м). При исследованиях по второй схеме интервал замедления принимали в пределах от 0 до  $\tau_{np}$  ( $\tau_{np}$  — время, при котором не наблюдался эффект взаимодействия волн напряжения).

Результаты измерений параметров взаимодействующих волн напряжения в направлении линии скважин приведены в табл. 7.

Анализ результатов исследований показал, что значения  $\bar{b}_{max}$  находятся в функциональной связи с интервалом замедления. Из приведенных в диссертации графиков и данных табл. 7 следует, что во всех опытах наблюдается один экстремум  $\bar{b}_{max}$ , который соответствует оптимальному значению интервала замедления. Максимальные напряжения при короткозамедленном взрывании имеют большее (на 40–60%) значение, чем при мгновенном.

Анализ осциллограмм, полученных по результатам опытов, свидетельствует, что:

— повышение максимальных напряжений обусловлено прежде всего наличием эффекта сложения амплитуд скорости смещения при условии сдвига во времени фаз обеих волн напряжения на величину не более  $0,3-0,4 t_{сж}$ . В этом случае наблюдается резкий рост амплитуды скорости смещения (а значит, и  $\bar{b}_{max}$ ) при незначительном увеличении общей длительности волны сжатия  $t_{сж}$  (см. табл. 7);

— в зоне разрушения ( $\bar{R} \approx 60$ ) удельный импульс (при оптимальном интервале замедления) имеет наибольшие значения; экстремальные значения удельного импульса  $\mathcal{I}$  соответствуют экстремальному значению  $\bar{b}_{max}$ . Однако с ростом интервала замедления удельный импульс снижается несколько медленнее, чем значения  $\bar{b}_{max}$ , что указывает на возможность "растягивания" импульса во времени по сравнению с мгновенным взрыванием;

Способ взрыва	Параметры волн напряжений при относительных расстояниях											
	60		80		120		160		240		320	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Мгновенное взрывание	Максимальные напряжения, кг/см <sup>2</sup>											
	484	100	237	100	115	100	44	100	16	100	11	100
Короткозамедленное взрывание двух зарядов при оптимальном интервале замедления	733	151	332	140	186	161	66	147	23	146	17	156
	Удельный импульс силы, кгсек/см <sup>2</sup> · 10 <sup>-3</sup>											
Мгновенное взрывание	242	100	142	100	66	100	31	100	23	100	18	100
	342	142	196	138	118	178	49	156	28	120	24	134
Короткозамедленное взрывание двух зарядов при оптимальном интервале замедления	Удельная энергия, кгсм/см <sup>2</sup>											
	320	100	56	100	17	100	1,8	100	0,65	100	0,35	100
645	202	101	181	37	210	3,4	186	1,38	212	0,82	235	

- в зоне упругих колебаний ( $\bar{R} \approx 60$ ) влияние  $\sigma_{max}$  на величину удельного импульса резко падает с расстоянием, однако возрастает значение времени замедления. Продолжительность действия удельного импульса увеличивается (за счет времени замедления), импульс растягивается во времени с расстоянием, его экстремум смещается вправо и сохраняется на больших интервалах замедления. Следовательно, в пределах зоны упругих колебаний при КЗВ в движение приводятся большие массы, чем при мгновенном взрывании. Это вызывает значительное снижение удельного импульса и удельной энергии. Так, на относительных расстояниях  $\bar{R} \approx 240$  снижение удельного импульса наблюдается до величины, почти равной удельному импульсу при мгновенном взрывании;

- значение удельного импульса при КЗВ всегда больше (на 20-80%) значения удельного импульса при мгновенном взрывании;

- наибольший поток удельной энергии наблюдается в зоне разрушения, причем эта энергия при КЗВ превышает величину удельной энергии при мгновенном взрывании примерно в два раза. В дальнейшем абсолютная величина удельной энергии резко уменьшается с расстоянием, однако относительная величина остается на прежнем уровне.

Исследования взаимодействия волн сжатия в направлении оси симметрии проводились по второй схеме. Датчики ориентировали в направлении линии между скважинами. Результаты измерений при разных способах взрыва приведены в табл. 8.

Анализ результатов исследований показал, что абсолютные значения максимальных напряжений  $\sigma_{max}$  на различных относительных расстояниях при короткозамедленном взрывании всегда меньше, чем при мгновенном; изменение функции  $\sigma_{max}(t)$  происходит линейно, причем, чем больше время замедления, тем меньше значения  $\sigma_{max}$  при КЗВ. При увеличении интервала замедлений значения максимальных напряжений при КЗВ в пределе стремятся к значениям  $\sigma_{max}$ , замеренным при взрыве единичного заряда.

Из рассмотрения опытных осциллограмм видно, что при достаточно коротком интервале замедления (в пределах  $0,3 t_{сж}$ ) происходит сложение напряжений по амплитуде и увеличение импульса сил (экстремальное значение). Дальнейшее увеличение интервала замедления постепенно ликвидирует эффект взаимодействия, в результате чего наблюдается снижение абсолютного значения удельного импульса до величин, характерных для взрыва единичного заряда.

Т а б л и ц а 8

Способ взрывания	Параметры волн напряжений при относительных расстояниях									
	80		120		160		240		320	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
<b>Максимальные напряжения, кг/см<sup>2</sup></b>										
Мгновенное взрывание	284	100	147	100	72	100	52	100	30	100
Короткозамедленное взрывание двух зарядов при оптимальном интервале замедления	271	95	124	84	69	95	49	94	28	93
<b>Удельный импульс силы, кгсек/см<sup>2</sup> · 10<sup>-3</sup></b>										
Мгновенное взрывание	148	100	128	100	91	100	75	100	43	100
Короткозамедленное взрывание двух зарядов при оптимальном интервале замедления	173	116	144	112	117	128	92	123	45	105
<b>Удельная энергия, кгсм/см<sup>2</sup></b>										
Мгновенное взрывание	86	100	32	100	11	100	6	100	2	100
Короткозамедленное взрывание двух зарядов при оптимальном интервале замедления	96	111	40	124	14	124	7	119	2	100

Удельный импульс в пределах зоны разрушения ( $\bar{R} \leq 60$ ) при короткозамедленном взрывании по второй схеме возрастает в среднем лишь на 17%, тогда как при взрывании по первой схеме он увеличивается в среднем на 50%. Удельная энергия при взаимодействии волн изменяется незначительно (см. табл. 8). Так, прирост удельной энергии в волне напряжения при взаимодействии составил лишь 19%. Причем с увеличением относительного расстояния прирост удельной энергии резко уменьшается и в пределе стремится к величине, соответствующей суммарной энергии, замеренной при одновременном взрыве двух зарядов.

Таким образом, короткозамедленное взрывание позволяет изменять параметры волн напряжений в требуемом для нас направлении и, в частности, получать импульс с высокими амплитудами напряжений, но непродолжительный, или импульс с низкими амплитудами напряжений, однако длительный. Выбирая оптимальный интервал замедлений,

можно управлять процессом взрывного разрушения и перемещения масс в зоне, где имеет место взаимодействие зарядов. При этом параметры волны и кинематические параметры перемещаемых масс будут зависеть от потенциальной энергии ВВ, начальных параметров ударных волн на границе раздела заряд - порода, свойств среды, определяющих закон распространения и затухания энергии волн, и других факторов. Время протекания процесса взаимодействия волн сжатия, в течение которого устанавливается наиболее благоприятное распределение напряжений и деформаций в массиве пород, определится из выражения

$$\frac{a}{c_p} \leq t_B \leq \frac{\lambda + a}{c_p}$$

Как установлено, наибольшее значение максимальных напряжений наблюдается во всех опытах при интервале замедления, соответствующем сдвигу фаз на величину  $t_n$  - время нарастания амплитуды скорости смещения частиц от взрыва предыдущего заряда. Таким образом, время, равное

$$t_{on} = \frac{a}{c_p} + t_n,$$

следует считать оптимальным с точки зрения эффективности взаимодействия полей напряжений.

Длина волны может быть установлена из выражения

$$\lambda = t_{сж} \cdot c_p$$

Для замера временных параметров волн напряжений была выполнена серия опытов в соответствии с методикой, приведенной ранее. Анализ данных измерений показал, что время существования положительной фазы волны напряжения в значительной степени зависит от упругих свойств и условий деформации горных пород. В общем виде кривая зависимости времени существования положительной фазы волны напряжения от величины заряда  $Q$  и расстояния  $R$  может быть аппроксимирована формулой

$$t_{сж} = \psi \cdot R^y \cdot Q^k, \quad (14)$$

где  $\psi$ ,  $y$ ,  $k$  - коэффициенты, зависящие от упругих свойств горных пород.

Как и время существования положительной фазы волны напряжения, время нарастания амплитуды массовой скорости смещения час-

тиц от 0 до максимального значения также зависит от характера исследуемых пород. В общем виде кривая зависимости времени нарастания  $t_n$  от величины заряда  $Q$  и расстояния  $R$  может быть аппроксимирована формулой вида

$$t_n = C \cdot R^{\gamma} \cdot Q^x, \quad (15)$$

где  $C$ ,  $\gamma$ ,  $x$  — коэффициенты, зависящие от упругих свойств пород.

Коэффициенты в эмпирических формулах (14) и (15) для некоторых горных пород месторождений Средней Азии представлены в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

Породы	Коэффициенты в формулах					
	(14)			(15)		
	$\psi$	$\gamma$	$\kappa$	$C$	$\gamma$	$x$
Крупноблочные известняки	2,58	0,55	0,18	0,64	0,80	0,05
Слабоокварцованные сиениты	1,10	0,62	0,12	0,30	0,79	0,06
Сильноокварцованные сиениты	1,85	0,58	0,24	0,28	0,81	0,06
Сиенит-диориты	1,50	0,56	0,21	0,32	0,73	0,09
Гранодиорит-порфиры	2,2	0,65	0,11	0,48	0,90	0,03
Вторичные кварциты	10,25	0,70	0,10	2,75	0,95	0,02

Качественный и количественный анализ поля напряжений при разных соотношениях  $\frac{Q}{W}$  показал, что структура полей при различных коэффициентах сближения зарядов, которые составляли 0,5; 1; 2, принципиально отлична. При коэффициенте сближения, равном 0,5-1, наблюдаются наиболее неблагоприятные условия для распределения напряжений в массиве горных пород. Наоборот, при изменении отношения  $\frac{Q}{W}$  от 1 до 2 происходит полная перестройка структуры поля напряжений и его характеристик. Значительно повышается роль сдвиговых деформаций вдоль линии зарядов. Интенсивность напряжений продолжает расти и при коэффициенте сближения зарядов более двух. Значит, при определенных схемах многорядного короткозамедленного взрывания выгодно располагать заряды в ряду и ряды в общей схеме так, чтобы коэффициент сближения зарядов был заведомо равен 2 или более. Это возможно осуществить при диагональном расположении рядов скважин (относительно откоса уступа) и других

схемах за счет уменьшения расстояния между рядами и увеличения расстояния между скважинами в ряду. Подобные схемы при коэффициенте сближения более двух успешно внедряются на карьерах цветной и черной металлургии СССР.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что характер взаимодействия взрывных волн, распространяющихся вдоль линии зарядов, а следовательно, качественные и количественные показатели разрушения, полученные при взрыве двух и более зарядов с замедлением, будут резко отличаться от характера взаимодействия взрывных волн, распространяющихся по оси симметрии (вторая схема).

При взаимодействии волн сжатия по первой схеме наблюдается:

— эффективное сложение волн сжатия, результатом чего является увеличение амплитуды скорости смещения (при оптимальном значении интервала замедления) или увеличение длительности волны сжатия. В первом случае наблюдается резкое возрастание напряжений и удельного импульса взрыва (примерно в 1,5 раза), а во втором — сохранение максимального удельного импульса во времени, что усиливает его действие на массив, а также увеличивает общий объем разрушаемого массива;

— увеличение длительности положительной фазы волны сжатия в 1,5-1,6 раза по сравнению с мгновенным взрыванием;

— повышение удельной энергии взрыва в объеме разрушения примерно в два раза (при одном и том же суммарном весе заряда).

Анализ результатов исследований показал также, что в случае взрывания по второй схеме наибольшие значения скорости смещения частиц наблюдаются в направлении откоса уступа, тогда как по первой схеме вектор скорости повернут на  $90^\circ$ , т.е. направлен параллельно откосу уступа. Это существенным образом изменяет характер перемещения разрушенных взрывом масс. Естественно, что в случае взрывания рядов зарядов или зарядов в ряду с развитием замедления (0, 1, 2, ...) вдоль линии фронта уступа перемещения масс будут минимальными. Подобное явление наблюдается при применении порядных поперечных и диагональных схем.

Методика расчета  $\tau_{on}$  и схемы замедления, предложенные в работе, были нами использованы при исследованиях процесса перемещения разрушенных масс взрывом скважинных зарядов.



Глава IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА  
СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ВВ

В процессе перемещения горной массы при взрыве, из-за разницы в градиенте скоростей, происходит значительное перемешивание (особенно при однорядном взрывании) составных частей объекта разрушения при одновременном изменении первоначального пространственного положения и формы рудных тел. Геометрические и структурные характеристики развала горной массы после взрыва и исходного объекта существенно различаются. Изучение физической природы процесса перемещения с целью выявления возможностей управления его основными кинематическими параметрами имеет самостоятельное научное и прикладное значение, особенно при оценке технологии взрывной отбойки рудных тел или рудоносных зон в условиях открытой разработки сложных месторождений.

Исследования выполняли методом моделирования на эквивалентных материалах с соблюдением законов подобия. Влияние сил тяжести на кинематические параметры и веса зарядов учитывали при моделировании в условиях перегрузок на линейном механическом ускорителе. Масштаб моделирования принимали, исходя из размеров фракций, входящих в состав материала модели, вида ВВ и критического диаметра заряда. Для имитации рудных тел при различном их пространственном расположении использовались модели слоистого строения. Процесс разрушения и перемещения фиксировали с помощью скоростной киносъемки, геометрические параметры развала и местоположение рудных тел в нем устанавливали прямыми измерениями по сечениям.

Результаты моделирования проверены в натуральных условиях. При этом процесс развития взрыва и кинематические параметры изучали с помощью скоростных киносъемок, а строение развала и его перемещения — с помощью глубинных реперов. Исследовался метод совместного взрывания с целью установления возможностей сохранения первоначальной геологической структуры массива в процессе формирования и развития "снопа" взрыва при однорядном и многорядном взрывании. При многорядном взрывании эксперименты выполняли как при наличии буфера, так и без него, т.е. на свободную поверхность.

В качестве критерия, определяющего величину возможных перемещений массива горных пород, слагающего уступ, принимали коэф-

фициент разрыхления горной массы в развале. Между замеренными параметрами перемещения устанавливали корреляционные связи, что позволило выявить долю участия каждого из них в процессе перемещения.

Статистическая обработка результатов исследований при однорядном расположении скважинных зарядов на уступе методом Кендалла-Спермана показала наличие корреляционной связи между скоростью перемещения и коэффициентом разрыхления  $K_p$  вида

$$V = 0,5K_p^2 - 0,88K_p + 0,99. \quad (I6)$$

Коэффициент корреляции  $\eta = 0,89$ .

Знание корреляционной зависимости  $V(K_p)$  для условий природы позволяет определять скорости перемещения разрушенной массы по значениям  $K_p$ . Следует заметить, что зона полученных значений коэффициента разрыхления справедлива при оптимальных зарядах рыхления. Для ширины развала и скорости перемещения установлена связь вида

$$L = 16,8V^2 + 16,44V + 20,74; \quad \eta = 0,72. \quad (I7)$$

Сравнительно небольшая величина коэффициента  $h$  говорит о наличии многосторонних связей нескольких параметров, а именно веса ВВ в скважинах, физико-механических свойств породы и других.

Третья связь между шириной развала и коэффициентом разрыхления выявлена как следствие первой (I6) и второй (I7). Она имеет вид

$$L = 37,3K_p - 2,56K_p^2 + 8; \quad \eta = 0,75.$$

Результаты исследования процесса формирования развала при однорядном взрывании позволили утверждать, что при данном способе взрывания происходят значительные перемещения частей уступа в процессе формирования развала.

Исследования метода совместного взрывания при многорядном расположении скважинных зарядов в условиях модели и непосредственно в массиве блока позволили установить, что при этом методе взрывания ширина развала остается постоянной и не зависит от количества взрываемых рядов, а при некоторых схемах многорядного короткозамедленного взрывания (поперечная, диагональная, обратная с предварительным оконтуриванием) даже сокращается. При этом коэффициент разрыхления горной массы в пределах собственно многорядного взрыва всегда ниже, чем в пределах развала от действия

взрыва первого ряда. Его изменение по высоте уступа  $H$ , как показали исследования на моделях, происходит согласно экспоненциальному закону

$$K_p = 0,98 e^{0,36H}$$

Аппроксимация экспериментальных данных по изменению скоростей перемещения частей уступа по высоте дала аналогичную зависимость. Результаты исследований на моделях были подтверждены экспериментальными исследованиями непосредственно в массивах горных пород (Коунрадское месторождение). Изменение коэффициента разрыхления с глубиной от поверхности развала  $h$  на участке между первым и последующими рядами скважинных зарядов представлено уравнением вида

$$K_p = 1,6 h^{-0,15}, \quad (18)$$

где 1,6 – верхний предел  $K_p$  для породы данного гранулометрического состава.

Формула (18) справедлива для расчета  $K_p$  в любой точке по высоте развала при верхнем пределе  $K_p = 1,6$ . В случае, если этот предел иной или вообще неизвестен, можно произвести необходимые расчеты по среднему значению коэффициента разрыхления путем интегрирования. Тогда

$$K_p^{cp} = \int_0^H K_m h^{-0,15} dh,$$

где  $K_m$  – максимальное значение  $K_p$  для пород данного гранулометрического состава;

$K_p^{cp}$  – среднее значение коэффициента разрыхления по всей высоте развала.

Значение  $K_p^{cp}$  в области между первым и последним рядами скважинных зарядов определяется на основании маркшейдерских съемок.

Таким образом, путем интегрирования при известных значениях  $K_p^{cp}$  и  $h$  можно определить  $K_m$ , а затем вычислить промежуточные значения коэффициента разрыхления на любом уровне по высоте развала.

При взрывании на буфер величина коэффициента разрыхления может быть определена из уравнения вида

$$K_p = 1,01 e^{0,14H}$$

В задачи исследований входило также установление влияния угла падения рудных тел на характер изменения контактов между рудой и породой при различных методах взрывания и выяснение качественной картины деформации в зависимости от мощности рудных тел. Результаты исследований подтвердили вывод о том, что при однорядном взрывании моделей коэффициент разрыхления изменяется пропорционально ширине развала. Измерения при многорядном взрывании моделей показали, что изменение коэффициента разрыхления происходит пропорционально изменению высоты развала в пределах между первым и последующими рядами скважин. Эти наблюдения позволили сделать основной вывод из всей серии экспериментов: степень перемешивания массива при взрыве, а следовательно, и степень нарушения входящих в него рудных тел определяются величиной коэффициента разрыхления.

Следовательно, коэффициент разрыхления массива при взрыве определяет степень деформации рудных тел, изменение линейных размеров и поверхности контактов рудного тела с вмещающими породами и является поэтому показателем влияния технологии буровзрывных работ на величину разубоживания и потерь руды. Снижение коэффициента разрыхления при взрывании означает уменьшение на ту же относительную величину разубоживания и потерь при выемке. Исследования, выполненные на моделях и в производственных условиях, показывают, что однорядное взрывание сложных блоков, широко применяемое на карьерах цветной металлургии, является нецелесообразным, так как приводит к нарушению контактов и перемешиванию руд и пород, значительной деформации рудных тел и увеличению разубоживания и потерь руды при выемке. Для снижения показателей разубоживания и потерь руды необходимо переходить на многорядное короткозамедленное взрывание сложных блоков. Однако в условиях сложных месторождений, часто отрабатываемых карьерами небольшой производительности с ограниченным фронтом работ, не всегда возможно применение многорядного взрывания. В связи с этим необходимо изыскивать такие методы взрывания, которые позволили бы снизить коэффициент разрыхления при обычном взрывании, т.е. ограничивали бы возможность образования широкого развала.

Глава У. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКИ  
РУДНЫХ МАССИВОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Обобщение и анализ опыта разработки сложных месторождений открытым способом, исследования закономерностей разрушения и перемещения массива горных пород взрывом определили основные направления совершенствования существующей и создания новой технологии отбойки рудных тел на карьерах.

В работе показано, что применительно к условиям разработки сложных месторождений неправильной формы наиболее перспективным является метод взрывания с сохранением первоначальной геологической структуры сложного блока. Основные принципы предлагаемой технологии отбойки могут быть сформулированы в следующем виде:

- пространственное положение рудных тел, контактов между рудой и породой, установленное в процессе эксплуатационной разведки, должно оставаться неизменным и основополагающим при выборе метода и способа предварительного рыхления массива, в котором расположены рудные участки, подлежащие выемке;

- методы и способы разрушения должны обеспечить минимальные для данных условий перемещения контактов, а также перемешивание рудных масс и вмещающих пород;

- качество дробления массива и объемы взрывания должны отвечать условиям достижения максимальной производительности погрузочного оборудования;

- экономические показатели буровзрывных и погрузочных работ должны устанавливаться в зависимости от стоимости конечного продукта.

Сущность метода заключается в том, чтобы обеспечить сохранность во взорванном массиве первоначального пространственного положения и формы рудных тел; средство достижения такого результата - многорядное короткозамедленное взрывание на неподобранный забой, а показатель минимального перемещения и нарушения контактов - коэффициент разрыхления горной массы. Наиболее типичными условиями, при которых применение этого метода наиболее эффективно по сравнению с другими методами ведения буровзрывных работ, являются:

по геологическим признакам - месторождения, представленные мощными рудоносными зонами типа штокверков, крупных линз, гнезд и пластообразных залежей с рудными телами сложной морфологии; отсутствие четких контактов между рудой и породой при выделении

условных контуров рудных тел или безрудных включений и некондиционных руд только на основании опробования;

по горнотехническим признакам - месторождения, разрабатываемые в устоявшемся режиме при соблюдении соотношения вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов. В этом случае, как правило, ширина рабочих площадок достаточна для многорядного расположения скважин при больших объемах бурения и взрывания. Так как деформация массива пропорциональна коэффициенту его разрыхления при взрыве, то наиболее успешное применение метода обеспечивается в породах легко- и средневзрываемых.

Метод взрывания с сохранением первоначальной структуры массива может применяться при любых параметрах системы разработки, однако с обязательным соблюдением оптимальных соотношений между высотой уступа, диаметром скважин и емкостью ковша экскаватора. По условиям разработки забоя, обладающего повышенной связностью в силу невысокого коэффициента разрыхления, требуется применение достаточно мощной погрузочной техники - карьерных экскаваторов скального типа. Внедрение (1961-1970 гг.) разработанной нами технологии взрывной отбойки рудных массивов в условиях сложных месторождений Средней Азии и Казахстана привело, как показала практика, наряду с улучшением общих показателей буровзрывных и погрузочных работ, к повышению полноты выемки полезных ископаемых, улучшению качества сырья, что незамедлительно отразилось на стоимости конечных продуктов.

Для подтверждения приведенного положения достаточно рассмотреть производственные показатели работы карьера и фабрики Балхашского горно-металлургического комбината до и после внедрения рекомендаций. Анализ показал, что за годы внедрения на предприятиях комбината (1967-1970 гг.) технологии взрывания с сохранением первоначальной геологической структуры существенно увеличилась производительность труда (до 20%), почти в два раза снизились общие простои экскаваторного парка, в 23 раза уменьшились простои экскаваторов по причине отсутствия забоев. Благодаря улучшению качества дробления горной массы, сократилось число случаев перекрытия дробилки обогатительной фабрики негабаритной рудой (с 64 в 1968 г. до 13 - в 1969 г.) при соответствующем сокращении общего времени простоев по этой причине с 81 до 22 ч. Анализ динамики изменения простоев мельниц обогатительной фабрики из-за отсутствия руды в бункерах за период 1962-1969 гг. показал, что суммарное время простоев снизилось с 1070 до 106 ч в год в среднем.

Т а б л и ц а 10

Комбинат, карьер	Годы внедрения рекомендаций	Эффективность внедрения
Киргизский горно-металлургический комбинат		
Буурдинский карьер	1961-1964	Общая экономия 167.000 руб. По предложенной технологии месторождение отработано полностью. Достигнуто фактическое снижение разубоживания в среднем на 2% ежегодно.
Кутес-Сайский карьер	1965-1966	Повышение качества добываемой руды и возможность последующей ее переработки в соответствии с выделенными технологическими типами улучшило процесс обогащения и привело, несмотря на некоторое удорожание добычи I т руды, к снижению себестоимости конечной продукции.
То же	1968-1969	При общем удорожании буровзрывных работ за счет контурного целевого взрывания в сумме 0,2 руб. на I т добытой руды снижение разубоживания руды с 20 до 7-8% позволило получить экономию за счет более полной выемки и повышения качества сырья, равную 4 руб. на I т руды.
Хайдарканский ртутный комбинат		
карьеры Главного поля и Кара-Арча	1961-1964	Общая экономия 275.000 руб. за счет внедрения рациональных параметров массовых взрывов и многорядного короткозамедленного взрывания.
карьер Южного поля	1965-1969	Произведена повторная отработка открытым способом рудного поля, ранее считавшегося списанным, с экономией 234.000 руб.
Алмалыкский горно-металлургический комбинат им. В.И. Ленина		
Кальмакырский карьер	1963-1966	Общая экономия 240.000 руб. за счет повышения производительности труда и снижения себестоимости продукции.
Кургашиканский карьер	1966-1969	Общая экономия 488.000 руб. за счет повышения производительности труда и снижения себестоимости продукции.

Широкое применение предложенного метода взрывания на Буурдинском карьере Киргизского горнообогатительного комбината, начиная с 1961 г. и до конца отработки месторождения, позволило, несмотря на прогрессирующее усложнение горногеологических условий в связи с погашением горных работ, сократить разубоживание и потери руды по сравнению с уровнем 1960 г. Ниже приведены данные (в %), свидетельствующие о таком сокращении:

	1960 г.	1961 г.	1962 г.	1963 г.	1964 г.
Разубоживание	13,7	11,7	8,5	10,4	9,3
Потери	12,2	8,9	7,8	8,3	7,6

Опыт Киргизского горно-металлургического комбината (1966-1969 гг.) показал, что внедрение новой технологии взрывания, несмотря на некоторое удорожание горных работ, в конечном итоге дает значительный экономический эффект на последующих переделах (обогащении, металлургии). Повышение качества добываемой руды за счет разделения ее в процессе выемки на типы и возможность последующей переработки в соответствии с этими типами позволило поднять извлечение металла в концентрат при обогащении более чем в два раза и соответственно снизить себестоимость конечной продукции. Эти примеры не единичны (табл. 10).

Достигнутые технико-экономические показатели не являются окончательными, так как в практике работы приведенных карьеров есть еще значительные резервы. Полное внедрение этих рекомендаций необходимо считать особо важным в свете последних решений Коммунистической партии и Правительства, призывающих работников науки и промышленности к активному претворению в жизнь новых методов и способов работ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

I. Современная технология разработки месторождений цветных и редких металлов является сложным и трудоемким процессом, поскольку добыча полезных ископаемых сопряжена с необходимостью отбойки и выемки рудных тел или рудоносных зон, характеризующихся разнообразным пространственным расположением и изменчивой формой залегания в условиях частой перемежаемости руд и пород при относительно высокой их крепости. Наличие подобных условий требует

применения более совершенной технологии буровзрывных работ с учетом специфических особенностей разработки сложных месторождений, зачастую коренным образом отличающейся от обычной технологии. Однако применяемая на карьерах технология буровзрывных работ и их параметры как в условиях простых, так и в условиях сложных месторождений не имеют существенных различий, что приводит к потерям металла при добыче и переработке руд и наносит значительный ущерб народному хозяйству.

2. Существующая технология, а также наметившаяся за последнее время определенная стабильность параметров взрывной отбойки обусловлены ограниченностью параметров бурового оборудования, предназначенного в основном для бурения вертикальных скважин большого диаметра (свыше 100 мм). Равенство диаметров скважин предопределяет примерное равенство параметров их расположения, а возможность бурения только вертикальных скважин ограничивает технологические возможности взрывных работ. В то же время взрывная отбойка рудных тел сложной морфологии требует достижения заданных показателей качественного дробления руд и пород при компактном размещении горной массы на месте взрыва и обеспечения сохранности рудных тел или рудоносных участков при минимальном нарушении контактов руд и пород.

3. В результате комплексных исследований основных закономерностей формирования ударных волн и их распространения, природы взаимодействия взрывов смежных зарядов при различных способах взрывания установлен ряд новых научных положений, способствующих решению проблемы качественного дробления скальных массивов взрывом:

- изучены качественные и количественные характеристики режима детонации промышленных взрывчатых веществ в зависимости от прочности оболочки, формы зарядов, их плотности и размеров, что может послужить основанием для выбора оптимальных диаметров скважинных зарядов для различных горногеологических условий;

- определены ударные адиабаты продуктов детонации исследуемых ВВ и параметры ударных волн на границе раздела в некоторых горных породах;

- выявлены основные условия формирования ударных волн на границе раздела заряд - порода;

- выявлен и сформулирован закон затухания давления и энергии взрывных волн в различных областях нагружения при взрыве единич-

ного заряда; дана качественная и количественная оценки потерь энергии в ближней зоне при взрывании в различных породах;

- определены принципиальные возможности получения качественно новых эффектов, обусловленных взаимодействием взрывов смежных зарядов, раскрыта физическая сущность механического действия взрыва двух и более зарядов при мгновенном и короткозамедленном взрывании.

4. В результате комплексных исследований процесса перемещения разрушенных масс при взрыве скважинных зарядов на уступе установлены следующие положения, способствующие развитию технологии отбойки рудных массивов в условиях сложных месторождений:

- выявлена физическая природа процесса сдвижения и перемещения массива;

- установлены основные кинематические параметры перемещающихся частей массива, слагающего уступ;

- выявлены закономерности распределения масс, слагающих уступ, при формировании развала и характер размещения рудных тел с различными условиями залегания при однорядном и многорядном взрывании;

- дана качественная и количественная оценка нарушения контактов и процесса перемешивания рудных тел с вмещающими породами при различных условиях их залегания и разных методах взрывания;

- выявлены и сформулированы условия сохранения при взрыве первоначального пространственного положения рудных тел и их формы в развале.

5. Разработаны и рекомендованы для использования в научных и практических целях:

- методика расчета начальных параметров ударных волн на границе раздела заряд - порода с программой для электронно-вычислительных машин;

- методика оценки энергоемкости горных пород, основанная на учете относительных интегральных потерь энергии волны при ее распространении;

- методика расчета основных параметров короткозамедленного взрывания, основанная на учете эффекта взаимодействия взрывов смежных зарядов.

6. Многолетнее использование разработанных автором рекомендаций на ведущих горно-металлургических комбинатах Средней Азии и Казахстана, включающих рациональные параметры массовых взрывов

с увеличенным коэффициентом сближения скважинных зарядов; схемы многорядного короткозамедленного взрывания с малыми временами замедлений; схемы отбойки, обеспечивающие сохранение первоначальной структуры рудных массивов, позволило поднять производительность труда на буровзрывных и выемочно-погрузочных работах в среднем на 25%, улучшить качественные показатели добычи и переработки руд высокоценных металлов. Общая экономия за период внедрения рекомендаций, по ориентировочным расчетам, составила около 3 млн.руб.

Представленный труд является завершением многолетнего этапа исследований автора в области изучения механизма разрушения горных пород взрывом и развития технологии буровзрывных работ в условиях сложных месторождений цветных и редких металлов. Результаты выполненных исследований позволяют в дальнейшем:

- обосновать и разработать параметрический ряд промышленных ВВ на основе изучения режимов детонации и взаимодействия детонационных волн с различными горными породами;

- создать методы экспериментального определения физического состояния массивов горных пород и методики контроля за изменением характеристик среды в процессе нагружения и после взрыва.

Работа неоднократно докладывалась научно-технической общественности на III, V, VI, VIII сессиях Ученого совета по народнохозяйственному использованию взрыва Академии наук СССР, на ряде всесоюзных совещаний по буровзрывным работам, совещаниях по проблеме короткозамедленного взрывания, развитию производительных сил Среднеазиатского экономического района, семинарах Междуправительственной комиссии по взрывному делу, научных советах Госкомитета по науке и технике Совета Министров СССР, производственно-технических совещаниях рудников и комбинатов Средней Азии и Казахстана.

По теме диссертации опубликовано 72 печатных работы. Основное содержание диссертации освещено в следующих работах автора:

1. Опытные работы по установлению условий применения короткозамедленного взрывания зарядов ВВ. - В кн. "Короткозамедленное взрывание в горном деле". М., Углетехиздат, 1956.

2. Исследование действия удлиненных зарядов ВВ в среде. - В сб. "Геология и горное дело", № 28. М., Metallurgizdat, 1958.

3. Опытные работы по применению короткозамедленного взрывания на открытых горных работах. - В сб. "Геология и горное дело", № 28. М., Metallurgizdat, 1958.

4. Совершенствование буровзрывных работ на карьерах цветной металлургии. - Бюллетень "Цветная металлургия", № 16. М., ЦИИНцветмет, 1958.

5. Исследование процесса разрушения горных пород при мгновенном и короткозамедленном взрывании. - В кн. "Исследование процессов бурения и взрывания". М., Углетехиздат, 1959.

6. Опыт буровзрывных работ на карьерах цветной металлургии. М., ЦИИНстроительства предприятий угольной промышленности, 1959 (соавторы В.Н.Мосинец, А.Д.Пашков).

7. Выбор и обоснование рациональных параметров массовых взрывов на открытых горных разработках. - В сб. "Труды всесоюзного совещания по буровзрывным работам при ИГД АН СССР". М., Углетехиздат, 1959.

8. Короткозамедленное взрывание на карьерах в СССР и за рубежом. Фрунзе, ИНТИ ГНТК Кирг.ССР, 1960 (соавтор В.Н.Мосинец).

9. Исследование взрывных характеристик взрывчатых веществ в зависимости от степени их влажности. Известия АН Кирг.ССР, т.П, вып.2. Фрунзе, АН Кирг.ССР, 1960 (соавтор В.Н.Мосинец).

10. Определение коэффициента вскрыши при разработке сложных месторождений с ограниченными поуступными запасами. - Известия АН Кирг.ССР, т.П, вып.2. Фрунзе, АН Кирг.ССР, 1960 (соавтор В.Н.Мосинец).

11. Экспериментальные исследования процесса разрушения горных пород взрывом. Фрунзе, АН Кирг.ССР, 1961 (соавторы А.Н.Ханукаев, В.Н.Мосинец).

12. Совершенствование технологии буровзрывных работ на рудных карьерах Киргизии. М., ЦИИНцветмет, 1961 (соавторы В.Н.Мосинец, В.Е.Клаповский, Е.М.Подойницын).

13. Основные пути развития и совершенствования технологии открытых разработок Средней Азии. - В сб.: "Материалы совещания по совершенствованию технологии горных работ на рудниках Киргизии". Фрунзе, ИНТИ ГНТК Кирг.ССР, 1961.

14. Опыт применения многорядного короткозамедленного взрывания с целью сохранения первоначальной структуры массива. - "Народное хозяйство Киргизии", 1962, № 10 (соавтор И.А.Тангаев).

15. Исследование процесса перемещения руд и пород при взрывании в условиях сложных месторождений. - Известия АН Кирг.ССР,

Фрунзе, АН Кирг.ССР, т.У, вып.І. 1963 (соавторы И.А.Тангаев, Н.А.Яковлева).

16. Условия сохранения первоначальной структуры массива при максимальном дроблении пород. - Известия АН Кирг. ССР, т.УІ, вып.2. Фрунзе, АН Кирг.ССР, 1964 (соавтор И.А.Тангаев).

17. Метод взрывания с предварительным оконтуриванием разрушаемого массива. - "Горный журнал", 1964, № 7 (соавтор В.Н.Мосинец).

18. *Une methode pour ameliorer l'utilisation de l'energie des explosifs. Explosifs*, № 4, 1964, S.85-91.

19. *Eine Methode zur Erhöhung der Energieausmiterung von Sprengstoffen. Bergakademie*, 4-5, 1964 S.217-221.

20. Экранирование энергии взрыва. - В сб. "Труды У сессии Ученого совета по народнохозяйственному использованию взрыва". Фрунзе, АН Кирг.ССР, 1965 (соавтор В.Н.Мосинец).

21. Оценка эффективности буровзрывных работ при разработке скельных руд и пород на карьерах цветной металлургии. - В сб. "Взрывное дело", № 57/І4. М., "Недра", 1965 (соавтор Е.М.Подойницын).

22. Исследование деформации рудных тел при взрывании сложных забоев. - В сб. "Буровзрывные работы в крепких породах". Фрунзе, "Илим", 1965 (соавторы И.А.Тангаев, Н.А.Яковлева).

23. Влияние технологии буровзрывных работ на разубоживание и потери руды. - В сб. "Взрывное дело", № 57/І4. М., "Недра", 1965, (соавтор И.А.Тангаев).

24. Взрывание высоких уступов в закатоной среде на Кальмакырском карьере. - В сб. "Взрывное дело", № 62/29. М., "Недра", 1967 (соавторы Б.Н.Байков, А.И.Березин).

25. О механизме короткозамедленного взрывания. - Известия АН Кирг.ССР, № 3, Фрунзе, "Илим", 1967 (соавтор Ф.А.Баум).

26. Механизм взаимодействия волн напряжения при различных способах взрывания. - "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1967, № 5.

27. Затухание волн напряжения в горных породах. Известия АН Кирг.ССР, № 7. Фрунзе, "Илим", 1968 (соавтор М.Н.Лейцин).

28. Исследование эффективности применения зарядов различной формы при разрушении горных пород взрывом. Информационный листок № 27, Фрунзе, ИНТИ при Госплане Кирг.ССР, 1968 (соавтор В.Е.Клаповский).

29. Новая технология буровзрывных работ для сложных месторождений. Фрунзе, ИНТИ при Госплане Кирг.ССР, 1968 (соавтор И.А.Тангаев).

30. Оценка степени разрушения массива методом прозвучивания. - В сб. "Совершенствование подземного и открытого способов разработки месторождений руд цветных металлов". М., ЦИИИцветмет, 1969 (соавтор Е.М.Подойницын).

31. Опыт селективной разработки сложных месторождений. Фрунзе, "Илим", 1969 (соавтор И.А.Тангаев).

32. Оценка энергоемкости горных пород при взрыве. - "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1969, № 5 (соавтор В.Е.Клаповский).

33. Основы расчета оптимальных интервалов замедления при короткозамедленном взрывании. - В сб. "Разрушение горных пород взрывом". Фрунзе, "Илим", 1970.

34. Формирование энергии ударных волн при взрывах скважинных зарядов. - В сб. "Управление энергией взрыва". Фрунзе, "Илим", 1970 (соавтор В.А.Коваленко).

35. Некоторые особенности деформации массива при многорядном короткозамедленном взрывании. - В сб. "Физика и механика разрушения горных пород взрывом". Фрунзе, "Илим", 1970 (соавторы И.А.Тангаев, Я.М.Додис).

36. Давление на контакте системы "заряд-среда". - В сб. "Управление энергией взрыва". Фрунзе, "Илим", 1970 (соавтор В.А.Коваленко).

37. Исследование закономерности изменения коэффициента разрушения во взорванном массиве. - В сб. "Физика и механика разрушения горных пород взрывом". Фрунзе, "Илим", 1970 (соавторы И.А.Тангаев, Я.М.Додис).

38. Роль и влияние поверхностей обнажения на эффект разрушения массива при короткозамедленном взрывании. - В сб. "Управление энергией взрыва". Фрунзе, "Илим", 1970.

39. Корреляционные связи процесса перемещения горной массы при взрыве скважинных зарядов. - В сб. "Физика и механика разрушения горных пород взрывом". Фрунзе, "Илим", 1970 (соавтор Я.М.Додис).

40. Исследование трещиноватости массива и влияния ее на степень дробления горных пород взрывом. - В сб. "Разрушение горных пород взрывом". Фрунзе, "Илим", 1970 (соавтор Е.М.Подойницын).

41. Короткозамедленное взрывание. Фрунзе, "Илим", 1970.

---

Евгений Герасимович Баранов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД  
ВЗРЫВОМ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Редакторы Л.А.Яковлева, Н.В.Власова

---

Л-43512

Тираж 200

Заказ № 5598

---

Ротапечатьный цех Института горного дела им.А.А.Скочинского  
2,8 уч.-изд.л. Подписано к печати 15/1 1971 г.