

6
А-30

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР

**ОТДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ И МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД**

На правах рукописи

Горный инженер **В. Е. КЛАПОВСКИЙ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ЗАРЯДОВ
РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Фрунзе 1967

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР

ОТДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ И МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

На правах рукописи

Горный инженер В. Е. КЛАПОВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ЗАРЯДОВ
РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — кандидат
технических наук В. Н. МОСИНЕЦ

Фрунзе 1967

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объемов добываемой горной массы, из которых более 50% необходимо разрабатывать с применением буровзрывных работ, требует систематического комплексного совершенствования существующих и создания принципиально новых технологических методов разработки и ведения буровзрывных работ на горнорудных и угольных предприятиях СССР. Последнее осуществимо на основе уменьшения потерь и перераспределения полной работы взрыва в сторону отдельных форм, соответствующих «полезной» работе, что имеет большое народнохозяйственное значение.

Современная теория и практика ведения взрывных работ располагает рядом методов, в которых возможность перераспределения полной работы использована с целью получения требуемых результатов действия заряда в среде. К числу таких методов относится «*n*»-кратное инициирование, метод, использующий явление кумуляции, взрывание с оконтуривающим врубом, метод взрывания с водовоздушными радиальными зазорами, взрывание с воздушными компенсаторами по длине заряда, взрывание в зажиме.

Кроме перечисленных методов, в последнее время была отмечена возможность повышения коэффициента полезного использования потенциальной химической энергии ВВ на основе применения зарядов различной формы (сферической, цилиндрической, плоской, комбинированной и т. д.).

Исследованию действия зарядов сферической и цилиндрической формы посвящен ряд фундаментальных работ М. А. Садовского, Г. И. Покровского, Н. В. Мельникова, Г. П. Демидюка, А. Н. Ханукаева, В. Н. Родионова и др. Плоские заряды стали применяться сравнительно недавно. Исследованию их действия в среде посвящены работы М. А. Лаврентьева, А. А. Черниговского, Л. В. Дубнова, Г. М. Ляхова, Ш. Г. Гамсахурдия и др.

Результаты выполненных в этом направлении эксперимен-

тально-теоретических исследований подтверждают наличие перераспределения энергии ВВ в зависимости от формы заряда в сторону увеличения коэффициента «полезного» механического действия.

Однако детальные исследования, посвященные сравнительному изучению особенностей действия зарядов разной формы, главным образом в горных породах, в настоящее время отсутствуют.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование особенностей распространения волн, генерируемых в различных средах зарядами сферической, цилиндрической, плоской формы, парносближенными зарядами и зарядами, формирующими плоский фронт.

Основные задачи, намеченные к решению в работе, определены на основании анализа современного состояния исследований в избранной области и рассмотрены ниже.

При решении поставленных задач использованы современные методы лабораторных экспериментальных исследований с привлечением радиоэлектронной и оптической аппаратуры, экспериментальные исследования в полевых условиях, технико-экономические анализы и расчеты.

Работы выполнялись с 1962 по 1966 г. в Лаборатории разрушения горных пород взрывом Института физики и механики горных пород Академии наук Киргизской ССР и в лабораториях Филиала Института химической физики Академии наук СССР.

Полупромышленные исследования проводились на полигонах Института физики и механики горных пород Академии наук Киргизской ССР.

Большая помощь автору при проведении исследований была оказана коллективами лабораторий Института физики и механики горных пород Академии наук Киргизской ССР и Филиала Института химической физики Академии наук СССР, всем сотрудникам которых выражается глубокая благодарность.

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую благодарность докт. физико-математических наук Ф. А. Бауму, Б. И. Шехтеру, докт. технических наук Г. М. Ляхову и Е. И. Шемякину за ценные указания и консультации в процессе подготовки работы.

Выполненная диссертационная работа содержит 173 стр. машинописного текста, скомпонованного в четыре главы, 86 иллюстраций, 44 таблицы и перечень использованной литературы.

Глава I. Современное состояние исследований параметров взрыва зарядов различной формы

Механическое воздействие взрыва заряда ВВ на среду обычно оценивается параметрами волны и конечным эффектом разрушения. К числу основных параметров волны относятся: давление на фронте P , скорость ударной волны D , скорость частиц за фронтом волны u , скорость упругой волны $D_{ф}$, $D_{м}$, время действия фазы сжатия t , импульс I и энергия E . Отличие в действии зарядов различной формы на среду должно проявляться в виде неравнозначного изменения указанных параметров.

В настоящее время наиболее полное теоретическое решение вопроса о распространении и действии сферических, цилиндрических и плоских волн произведено в таких средах, как воздух и вода.

Установленные закономерности изменения $P = P(\bar{r})$ для различных форм зарядов в воде и воздухе, имея большое научное значение для общего развития физики рассматриваемых процессов, не могут быть использованы при рассмотрении действия взрыва в твердых средах, характер поведения которых при взрывном нагружении принципиально иной.

Ввиду этого имеющиеся теоретические решения не являются конечными. Тем не менее анализ их показывает, что распространение в среде волн, создаваемых взрывом зарядов сферической, цилиндрической или плоской формы, характеризуется рядом особенностей:

1. Потенциальная химическая энергия зарядов ВВ равного веса, но разной формы расходуется неодинаково. При этом форма заряда является одним из главных факторов, определяющих отмеченную неоднозначность в распределении энергии во времени и пространстве.

2. В общем виде изменение параметров (на примере давления P) в функции формы заряда и расстояния может быть представлено в виде:

$$P_{сф} = \frac{A_1}{(r)^{\alpha_1}}; \quad P_{цл} = \frac{A_2}{(r)^{\alpha_2}}; \quad P_{пл} = \frac{A_3}{(r)^{\alpha_3}}; \quad \alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3. \quad (1)$$

3. Теоретические исследования позволяют приблизительно оценить значения величин $A_1, 2, 3$, и $\alpha_1, 2, 3$. Истинные их значения могут быть получены на основе экспериментального изучения параметров волн, учитывающего реальные свойства среды.

4. Из приведенных зависимостей (1) следует, что соотно-

шение коэффициентов общего «полезного» механического действия без учета свойств среды может быть для различных форм заряда выражено неравенством $\eta_{\text{плоский}} > \eta_{\text{цилиндр}} > \eta_{\text{сфера}}$ (2), что определяет использование зарядов различной формы в целях повышения коэффициента «полезного» механического действия взрыва. При этом следует отметить, что рассмотренные теоретические решения, базируясь на ряде допущений (детонация заряда ВВ мгновенная, удар продуктов взрыва происходит по недеформируемой преграде, поведение сред в условиях взрывного динамического нагружения абсолютно упруго и др.), приводят к значительным погрешностям в решении поставленных задач, которые могут быть устранены лишь при условии проведения экспериментальных исследований в этой области.

Анализ результатов экспериментальных исследований различных авторов, выполненных к сожалению в несопоставимых условиях, свидетельствует о наличии принципиальных отличий в действии сферических, цилиндрических и плоских зарядов. Так, в исследованиях Г. М. Ляхова отмечается, что на одинаковых относительных расстояниях $\bar{r} > 2 \div 4 r_0$ падение давления в сферической волне происходит значительно быстрее, чем в плоской. Аналогично изменяются и другие параметры волны. Сравнение данных исследований А. Н. Ханукаева показывает, что на одних и тех же относительных расстояниях абсолютные значения и интенсивность изменения максимального напряжения, импульса, а также энергии на фронте волны значительно в случае сферического взрыва, чем цилиндрического, а время действия фазы сжатия больше у цилиндрического заряда, нежели у сферического. Аналогичные результаты получены и в других экспериментальных работах.

Следовательно, как теоретические расчеты, так и имеющийся практический опыт подтверждают возможность и целесообразность перераспределения энергии на разрушение и перемещение среды на основе применения зарядов различной формы.

Однако полученные в результате экспериментально-теоретических исследований качественные и количественные зависимости действия взрыва зарядов различной формы в различных средах не могут быть признаны исчерпывающими в силу того, что:

1. В рассмотренных исследованиях отсутствуют результаты сравнительного изучения действия сферических, цилиндрических и плоских форм зарядов в сопоставимых условиях, позволяющие установить эффективность применения той или иной формы.

2. Проведенные исследования, за исключением водовоздушных сред, относятся в основном к расстояниям $R > 5 \cdot 10 r_0$. Между тем, наиболее существенное влияние формы заряда на распределение параметров во времени и пространстве проявляется в ближней зоне при $R < 5 r_0$. Следовательно, знание ближней зоны совершенно необходимо для изучения особенностей действия зарядов различной формы и на более далеких расстояниях.

3. В современных исследованиях форм зарядов недостаточное внимание уделено изучению параметров детонации и сжимаемости среды, хотя от этих факторов во многом зависит существование волны вблизи заряда и на более далеких расстояниях.

В связи с отмеченными положениями настоящая работа ставит своей целью всестороннее исследование особенностей действия в горных породах зарядов различной формы, что осуществимо на основе решения следующих задач:

1. Исследование параметров детонации ВВ в зависимости от формы и размеров заряда.

2. Исследование ударной сжимаемости метаморфических и осадочных горных пород на примере мрамора, известняка и глинистого алевролита с целью определения параметров ударных волн в ближней зоне действия зарядов различной формы.

3. Изучение параметров волн при действии в различных средах сферических, цилиндрических, парносближенных, плоских зарядов и зарядов, формирующих плоский фронт.

4. Оценка энергоемкости исследованных горных пород на основе распределения относительных интегральных потерь энергии волны при её распространении в среде.

5. Оценка эффективности и экономической целесообразности применения различных форм зарядов на основе сравнительного анализа интегральных потерь энергии и технико-экономических показателей ведения буровзрывных работ различными методами.

Глава II. Исследование параметров детонации зарядов конденсированных ВВ различного диаметра и формы

Большинство современных промышленных ВВ являются относительно слабыми смесями, детонирующими в неидеальных режимах при сравнительно небольших размерах зарядов, применяемых на практике. В связи с этим различие в параметрах детонации у зарядов разной формы может быть особенно заметно. А это определяет увеличение или ослабление разрушающего действия взрыва на окружающую среду.

Поэтому экспериментальное изучение режимов детонации зарядов различной формы и явилось одной из основных задач исследования.

Определение таких параметров детонации, как скорость детонации D , скорость частиц за фронтом волны u , давление на фронте детонационной волны P_φ и в плоскости Чепмена-Жуге P , время основной части химической реакции τ и время существования волны t , показателя политропы n , ширины зоны химической реакции a , энергии внутреннего сжатия объема единицы массы вещества в детонационной волне E и скорости звука в продуктах взрыва C может быть произведено электромагнитным методом с использованием стационарного электромагнита конструкции КБ ФИХФ АН СССР, рассчитанного по прочности на взрывание тротиловых зарядов не свыше 10 кг.

Достоинством применявшегося в исследованиях электромагнитного метода является возможность одновременного (в условиях одного эксперимента) определения u , τ , t , D и расчета по измеренным значениям параметров P , ρ , a , E , n . При этом сокращается количество опытов и исключаются ошибки, связанные с разбросом от опыта к опыту.

Опыты проводились с зарядами сферической, цилиндрической и плоской формы разных диаметров d и толщин Δ . В качестве конденсированного ВВ использовался предохранительный аммонит ПЖВ-20. Начальная плотность ВВ во всех опытах была неизменной и составляла $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$. Заряды помещались в парафиновые оболочки, не оказывающие существенного влияния на параметры детонации. В различных формах зарядов исследуемые диаметры изменялись в диапазоне: у сферы — 50—120 мм, у цилиндра — 26—120 мм и у слоя — 17—60 мм. Длина заряда по отношению к его диаметру оставалась неизменной и составляла $>5d$. Для плоских и цилиндрических зарядов датчики, фиксирующие детонационные параметры, располагались на расстоянии $4,5(d, \Delta)$ от инициатора, что обеспечивало (в соответствии с данными Кука) запись параметров детонации в стационарном режиме. В случае сферических зарядов датчик располагался на сферической поверхности исследуемого диаметра. Иницирование сферических зарядов производилось из центра заряда искровыми электродетонаторами, цилиндрических — с одного из торцов детонаторами ЭД-8-56, плоских зарядов — с торцевой поверхности теми же детонаторами.

Результаты экспериментальных исследований параметров детонационных волн в зарядах различной формы и размера приведены в таблице 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения параметров детонации зарядов сферической, цилиндрической и плоской формы

$d, \text{ мм}$	$D, \text{ мм/мксек}$	$U, \text{ мм/мксек}$	$P \cdot 10^3, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	$E, \text{ кгМ/г}$	n	$\tau, \text{ мксек}$	$a, \text{ мм}$
Сферический*							
50	3,065	0,621	19,1	19,3	—	—	—
60	3,320	0,752	25,3	28,6	—	—	—
80	3,742	0,971	36,3	47,1	—	—	—
120	3,980	1,243	49,5	77,1	2,22	0,55	1,45
Цилиндрический							
26	3,395	1,151	39,8	67,5	1,96	0,89	1,70
32	3,611	1,213	44,8	75,3	1,98	0,81	1,68
40	3,823	1,252	48,8	80,0	2,05	0,74	1,62
60	4,224	1,315	56,8	88,3	2,20	0,63	1,57
120	4,541	1,373	63,5	95,7	2,32	0,56	1,53
Плоский							
17	3,442	1,183	41,5	71,2	1,92	0,83	1,59
25	3,661	1,242	46,5	78,7	1,94	0,76	1,56
34	3,883	1,304	51,6	86,7	1,98	0,71	1,55
50	4,271	1,360	59,4	94,5	2,14	0,61	1,53
60	4,394	1,378	62,1	97,3	2,18	0,58	1,49

* Для зарядов сферической формы в графах U , P даны значения на ударном фронте детонационной волны.

В результате анализа проведенных экспериментальных исследований установлено:

1. Параметры детонационных волн в плоскости Чепмена-Жуге U , P , а также D , E растут с увеличением диаметра заряда одной и той же формы, а τ и a уменьшаются.

2. Параметры детонационных волн существенно зависят от формы заряда:

Параметры детонации	Сфера $d=60 \text{ мм}$	Цилиндр, $d=60 \text{ мм}$	Плоский, $\Delta=60 \text{ мм}$
Скорость детонации $D, \text{ мм/мксек}$	3,32/100%	4,22/127%	4,40/133%
Давление $P \cdot 10^3, \text{ кг/см}^2$	25,5 /100%	57,1 /223%	62,5 /246%
Отношение длины волны к диаметру заряда x/d	0,2 /100%	0,5 /250%	0,67/335%

3. Отличие в параметрах детонации у зарядов разной формы объясняется различным характером и условиями разлета ПВ, определяющими также время и ширину зоны химической реакции ВВ, которые минимальны у плоских зарядов и максимальны у сферических.

4. В случае сферической детонации (до $d = 120$ мм) наблюдается нестационарный процесс детонации, а у цилиндра и плоского заряда процесс стационарный, но неидеальный.

5. Изменение скорости частиц за фронтом волны во времени и соотношение экспериментальных значений параметров детонации в плоскости Чепмена-Жуге у зарядов ПЖВ-20 различной формы позволяют считать, что плоский заряд толщиной, равной диаметру цилиндрического и сферического зарядов, при равных весах зарядов будет более эффективен с точки зрения генерирования в окружающей среде ударных волн большей интенсивности и продолжительности. Эта большая эффективность возможна за счет более высоких давлений в плоскости Чепмена-Жуге, а также более медленного спада массовой скорости за ней.

В связи с этим представляет интерес изучение распространения волн, вызванных детонацией зарядов различной формы в сплошной среде (как в ближней зоне, так и на дальних расстояниях). Для исследования изменения параметров волны в ближней зоне необходимым условием является изучение ударной сжимаемости среды.

Глава III. Исследование ударной сжимаемости некоторых метаморфических и осадочных горных пород

Рассмотренные в работе общий механизм ударного сжатия твердого вещества и его уравнение состояния свидетельствуют о прямой возможности определения как термодинамических параметров состояния, так и динамических характеристик среды в условиях ударного сжатия в различном диапазоне давлений. Для полной качественной и количественной оценки этих параметров необходимо и достаточно экспериментальное определение адиабаты ударного сжатия исследуемой горной породы.

Предметом исследования при изучении ударной сжимаемости горных пород избраны метаморфические (мрамор, $\rho_0 = 2,7 \frac{г}{см^3}$) и осадочные (известняк, $\rho_0 = 2,4 \frac{г}{см^3}$, глинистый

алеурит, $\rho_0 = 1,77 \frac{г}{см^3}$) породы, исследованные ранее в дальней

($R > 10 r_0$) зоне действия взрыва зарядов различной фор-

мы. Данный методический прием позволяет в целом оценить особенности распространения волн, генерируемых зарядами: различной формы) как в непосредственной близости от заряда, так и на любых расстояниях (вплоть до $300 r_0$), а так как сами горные породы существенно отличаются по физико-механическим свойствам, то их поведение в условиях ударного сжатия может представить и самостоятельный интерес.

В качестве экспериментальных методов изучения ударной сжимаемости в работе использованы электромагнитный метод, метод «откола», «отражения», «торможения» и их комбинации. Для установления факта изменения вещества в области фазового превращения в работе использовался метод «сохранения», сущность которого заключается в обжати исследуемого вещества сходящейся цилиндрической детонационной (ударной) волной и его последующем сохранении на основе применения системы капсул.

Результаты экспериментальных исследований ударной сжимаемости глинистого алеурита, известняка и мрамора представлены в табл. 2.

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что рассматриваемые горные породы являются трехкомпонентными средами. Содержание газообразного α_1 , жидкого α_2 и твердого α_3 компонента определяет характер их поведения в условиях взрывного нагружения. Степень сжатия горных пород в зависимости от прилагаемого давления неодинакова и характеризуется наличием двух областей: области больших деформаций в диапазоне $P \leq 2 \cdot 10^4 \frac{кг}{см^2}$, когда состояния системы существенно отличаются между собой при изменении давления, и области малых деформаций в диапазоне $P > 2 \cdot 10^4 \frac{кг}{см^2}$, когда состояния системы отличаются незначительно.

Физически в основе существования данных областей лежат такие физико-механические характеристики среды, как пористость, влажность и различный по сжимаемости состав твердой компоненты α_3 . Для исследованных горных пород характерно наличие областей фазового превращения, координаты которых меняются в зависимости от состава пород. На основе исследований ударной сжимаемости возможно также и определение динамических упругих постоянных пород. Сопоставление полученных в работе данных с данными других авторов, достигнутыми на основе импульсного ультразвукового прозвучивания пород, свидетельствуют о близкой их схожести и преемственности метода.

Общие итоги проведенных исследований по изучению удар-

Результаты экспериментального исследования ударной сжимаемости

Метод исследования	Источник ударных волн	Параметры ударного сжатия									
		1	2	3	4	5	6	7	8		
		скорость ударной волны D , км/сек	скорость частиц U , км/сек	давление $P \cdot 10^3$, кг/см ²	удельный объем V , см ³ /г	плотность ρ , г/см ³	степень сжатия σ				
Глинистого алевролита											
Электромагнитный	Тротил-талък 40/60, $\rho_0=1,44$, $d=80$ мм	1,112	0,300	6,071	0,413	2,442	1,37				
		1,805	0,706	23,007	0,344	2,907	1,64				
Метод «отражения»	ТНТ, $\rho_0=1,20$, $d=40$ мм	2,721	1,191	58,373	0,318	3,141	1,78				
		2,985	1,335	71,951	0,312	3,202	1,81				
		3,386	1,545	94,454	0,307	3,255	1,84				
		3,779	1,815	123,812	0,294	3,406	1,92				
	ТГ, 50/50, $\rho_0=1,64$ мм	4,102	2,000	148,123	0,289	3,454	1,95				
Метод «отражения» и «торможения»	ТГ 50/50, $\rho_0=1,58$, $d=120$ мм	5,522	3,680	366,295	0,188	5,306	3,00				
Электромагнитный	Тротил/талък 40/60, $\rho_0=1,44$, $d=80$ мм	Известняка									
		2,444	0,500	29,908	0,331	3,017	1,26				
		2,762	0,645	43,615	0,319	3,131	1,30				
		3,578	1,012	88,641	0,299	3,346	1,39				
Метод «отражения»	ТНТ, $\rho_0=1,20$, $d=40$ мм	3,862	1,135	107,313	0,294	3,399	1,42				
		4,265	1,325	138,342	0,287	3,481	1,45				
		4,405	1,450	156,364	0,279	3,577	1,50				
		4,325	1,457	154,262	0,276	3,619	1,51				
Метод «торможения» и «отражения»	» = 1,58 » ТГ 50/50, $\rho_0=1,64$ » ГС, $\rho_0=1,71$ » ТГ 50/50, $\rho_0=1,58$, $d=120$	4,506	1,602	176,714	0,269	3,723	1,55				
		4,670	1,700	205,731	0,264	3,770	1,57				
		5,157	1,955	246,805	0,259	3,865	1,61				
		7,123	3,130	545,781	0,234	4,281	1,78				
		Мрамора									
		Электромагнитный	ПЖВ-20, $\rho_0=1,00$, $d=120$	4,728	0,669	87,061	0,318	3,145	1,17		
				5,136	0,873	123,420	0,308	3,252	1,20		
				5,250	0,930	134,521	0,305	3,281	1,22		
				5,388	0,999	148,230	0,302	3,314	1,23		
		Метод «отражения»	ТНТ, $\rho_0=1,44$, $d=40$ » ТГ 50/50, $\rho_0=1,64$, $d=40$ » ГС, $\rho_0=1,76$, $d=40$	5,412	1,079	161,305	0,296	3,375	1,25		
				5,980	1,515	250,000	0,276	3,621	1,34		
				6,451	1,879	333,800	0,262	3,820	1,41		

ной сжимаемости некоторых осадочных и метаморфических горных пород показывают, что:

1. Исследованные горные породы ведут себя как многокомпонентные среды. Участие каждой из компонент в процессе сопротивления ударному сжатию определяется её первоначальным объемным содержанием и термодинамическим состоянием в том или ином диапазоне взрывного нагружения.

2. Состояние глинистого алеврита в условиях ударного сжатия в области давлений до $150 \cdot 10^3$ кг/см² аппроксимируется в виде:

$$D = 0,577 + 1,782U, \text{ км/сек}, \quad P = 835 \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{7,51} - 1 \right] \text{ кг/см}^2 \quad (3)$$

3. Уравнение состояния известняка в условиях ударного сжатия в области давлений до $550 \cdot 10^3$ кг/см² может быть представлено в виде:
до фазового превращения — $D = 1,336 + 2,215 U, \text{ км/сек}$ (4)

$$P = 7,85 \cdot 10^3 \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{7,55} - 1 \right], \text{ кг/см}^2;$$

после фазового превращения $D = 1,710 + 1,743 U, \text{ км/сек}$. (5)

Границы области фазового превращения определяются координатами $P_A = 148 \cdot 10^3$ кг/см², $P_B = 163 \cdot 10^3$ кг/см²; $\varepsilon_A = 1,45$; $\varepsilon_B = 1,52$.

4. Полученные экспериментальные данные по ударной сжимаемости и фазовому превращению мрамора хорошо согласуются с данными исследований Г. А. Ададунова, А. Н. Дремина и др.

5. Для изученных горных пород характерно наличие фазового превращения, связанного с превращением основной составляющей твердой компоненты α_3 .

6. Установленные уравнения состояния горных пород дают возможность определения параметров ударных волн в ближней зоне действия взрыва. Для этого необходимо и достаточно измерить какую-либо одну волновую характеристику процесса.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования ударной сжимаемости горных пород на примере глинистого алеврита, известняка и мрамора в сочетании с исследованием режимов детонации позволяют перейти к рассмотрению особенностей распространения параметров волн, генерируемых в среду зарядами различной формы.

Глава IV. Исследование особенностей изменения параметров волн при действии сферических, цилиндрических и плоских зарядов в различных средах

Осуществление поставленной цели применительно к зарядам различной формы возможно на основе решения следующих задач:

1. Экспериментальное исследование скорости частиц за фронтом волны во времени $u = u(t)$ и пространстве $u = u(\bar{r})$ в различных средах (парафин, глинистый алеврит, известняк, мрамор).

2. Изучение изменения параметров волн D, P, I, E_2, E_1 , а также P и σ в функции расстояния в ближней зоне ($< 10 r_0$) действия взрыва зарядов в парафине, глинистом алеврите, известняке и мраморе на основе исследования их ударной сжимаемости.

3. Изучение особенностей распределения параметров волн в дальней зоне ($> 10 r_0$) действия взрыва в глинистом алеврите.

4. Изучение относительных интегральных потерь энергии волны в зависимости от расстояния.

5. Оценка энергоемкости исследованных горных пород на основе распределения относительных интегральных потерь энергии волны при ее распространении в среде.

6. Оценка эффективности и экономической целесообразности применения различных форм зарядов на основе сравнительного анализа относительных интегральных потерь энергии и технико-экономических показателей ведения буровзрывных работ различными методами.

Методически решение указанных задач осуществлялось отдельно по ближней ($< 10 r_0$) и дальней зоне действия взрыва. В связи с этим для регистрации волновых параметров применялись два метода. Электромагнитный метод измерения скорости частиц за фронтом ударной волны и скорости ударного фронта использовался при исследовании параметров волн в ближней зоне действия заряда ВВ. На более далеких расстояниях применялся тензометрический метод измерения давления и времени существования положительной фазы волны.

Так как при изучении параметров ударных волн, генерируемых в среду зарядами цилиндрической и плоской формы, профиль их обладает некоторой кривизной, а направление движения вещества за фронтом волны не совпадает с нормалью к силовым линиям поля, то в этой связи для ближней зоны была разработана и реализована методика экспериментального определения пространственной конфигурации про-

филей ударных волн и расчета на этой основе по измеренным значениям вертикальной составляющей u_1 истинной скорости движения частиц вещества за фронтом волны u_0 .

В ближней зоне действия взрыва опыты проводились со сферическими, цилиндрическими и плоскими зарядами, формирующими в среде соответствующие по своей пространственной конфигурации ударные волны сферической и криволинейной формы. Кроме этого, исследовались волны с плоским фронтом. В качестве ВВ использовался предохранительный аммонит ПЖВ-20, $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$. Геометрические размеры зарядов выбирались на основе прочностных характеристик электромагнитной установки и условий стационарной детонации: диаметр сферических и цилиндрических зарядов составлял в опытах 40 мм, а толщина плоского заряда и заряда, формирующего в среде плоский ударный фронт, была равна 20 мм. Схемы инициирования зарядов различной формы выбирались в соответствии с возможностями практического использования зарядов.

Изучение особенностей распространения ударных волн, генерируемых зарядами различной формы, производилось в парафине, глинистом алевролите, известняке и мраморе.

В дальней зоне действия взрыва изучение волн производилось в глинистом алевролите при взрыве сферических, цилиндрических, плоских и парносближенных цилиндрических зарядов. В качестве ВВ, так же как и в ближней зоне, использовался предохранительный аммонит ПЖВ-20 плотностью $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$. При неизменном весе зарядов ($Q = 1,0 \text{ кг}$) в различных формах исследуемые диаметры изменялись в следующем диапазоне: сфера $d = 120 \text{ мм} = \text{const}$, цилиндр — $d = 40 \text{ мм}$ при соотношении длины заряда к его диаметру $\frac{l}{d} = 20$, плоский

заряд толщиной $\Delta = 34,2 \text{ мм}$ при соотношении длины стороны квадрата к толщине заряда (заряды квадратные)

$\frac{l}{\Delta} = 5,0$; $\Delta = 25,0 \text{ мм}$ при $\frac{l}{\Delta} = 8,0$; и $\Delta = 16,5 \text{ мм}$ при $\frac{l}{\Delta} = 15,0$.

При исследовании параметров волн, создаваемых парносближенными зарядами, диаметр и их вес оставался неизменным и составлял для каждого из зарядов $d = 40 \text{ мм}$, $Q = 1,0 \text{ кг}$. Расстояние между зарядами в паре было $15r_0$. Установка датчиков и зарядов производилась по их центру тяжести на глубине 0,75 м. Расстояние от источника взрыва до датчика при

Таблица 3

Экспериментальные значения параметров ударных волн в известняке

r	U , км/сек	D , км/сек	$P \cdot 10^3$, кг/см ²	I , кг/сек/см ²	ρ , г/см ³	E_1 , кг/м/г	$E_2 \cdot 10^6$, кг/м/м ²
1,00	1,182	3,954	114,0	0,604	3,42	68,64	14,85
2,06	1,109	3,792	102,91	0,566	3,39	62,89	13,07
3,00	1,035	3,628	91,9	0,528	3,35	54,79	11,38
4,25	0,940	3,418	78,6	0,479	3,31	45,18	9,39
1,00	1,022	3,599	90,0	0,499	3,35	53,41	10,9
1,50	0,621	2,711	41,2	0,303	3,11	19,74	3,92
2,21	0,425	2,277	23,6	0,208	2,95	9,25	1,83
3,40	0,282	1,960	13,5	0,138	2,80	4,08	0,80
3,90	0,250	1,889	11,5	0,122	2,76	3,20	0,63
4,40	0,222	1,827	9,9	0,109	2,73	2,52	0,50
5,60	0,185	1,745	7,9	0,090	2,68	1,75	0,34
6,30	0,173	1,719	7,2	0,084	2,66	1,53	0,30
1,00	0,979	3,504	83,9	0,478	3,33	49,00	9,76
1,25	0,615	2,698	40,6	0,301	3,10	19,35	3,85
1,63	0,351	2,113	18,1	0,171	2,87	6,31	1,25
2,05	0,214	1,810	9,4	0,105	2,72	2,35	0,46
2,62	0,126	1,615	4,9	0,062	2,60	0,81	0,16
3,75	0,059	1,466	2,1	0,029	2,50	0,18	0,03
1,00	0,948	3,435	79,7	0,441	3,31	45,96	8,70
1,25	0,438	2,306	24,7	0,204	2,96	9,82	1,85
1,51	0,261	1,914	12,2	0,121	2,77	3,49	0,65
2,03	0,134	1,632	5,3	0,062	2,61	0,92	0,17
2,72	0,081	1,515	3,0	0,038	2,53	0,33	0,06
3,72	0,033	1,409	1,1	0,015	2,45	0,05	0,01

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР

328961

Таблица 4

Экспериментальные значения параметров волн напряжения в глинистом алеврите от зарядов различной формы

Размеры заряда, см	Относительное расстояние, r	Массовая скорость $U \cdot 10^{-3}$ км/сек	Напряжение σ , кг/см ²	Время существования волны $t \cdot 10^{-3}$, сек	Градиент напряжения $\frac{t_a}{t_s}$	Интенсивность сдвигающих напряжений, τ , кг/см ²	Энергия волны E_2 кгм/м ³
Плоский заряд							
$\Delta=2,5$	158	0,936	2,742	39,11	0,305	2,450	2343,0
$\frac{l}{\Delta}$	319	0,425	1,187	56,66	0,412	1,003	391,0
$\frac{\Delta}{d}=8,0$	429	0,202	0,583	69,66	0,571	0,532	98,2
Парносближенные цилиндрические заряды							
$d=4,0$	119	0,871	2,305	34,50	0,261	2,168	1506,0
	238	0,533	1,182	47,16	0,359	1,006	304,0
	357	0,239	0,706	68,03	0,442	0,618	201,4
Цилиндрический заряд							
$d=4,0$	65	0,788	2,372	207,05	0,263	2,050	1859,7
$\frac{l}{d}$	199	0,243	0,957	49,30	0,448	0,844	206,0
$\frac{d}{d}=20$	301	0,152	0,450	55,66	0,645	0,424	70,4
Сферический заряд							
$d=6,2$	27	0,502	1,866	26,00	0,221	1,623	573,9
	37	0,301	1,145	33,51	0,379	0,915	176,6
	193	0,110	0,298	47,25	0,705	0,194	49,0

этом составляло для сферических, цилиндрических и плоских зарядов 2, 4 и 6 м, а для парносближенных 1,5; 3,0 и 4,5 м. Иницирование зарядов производилось промышленными электродетонаторами типа ЭД-8-56.

Результаты экспериментальных исследований на примере известняка для ближней зоны представлены в табл. 3.

Результаты экспериментального исследования особенностей распространения волн у зарядов различной формы в глинистом алеврите на дальних расстояниях ($>10 r_0$) от источника взрыва приведены в табл. 4.

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что независимо от характеристик среды парамет-

S, %

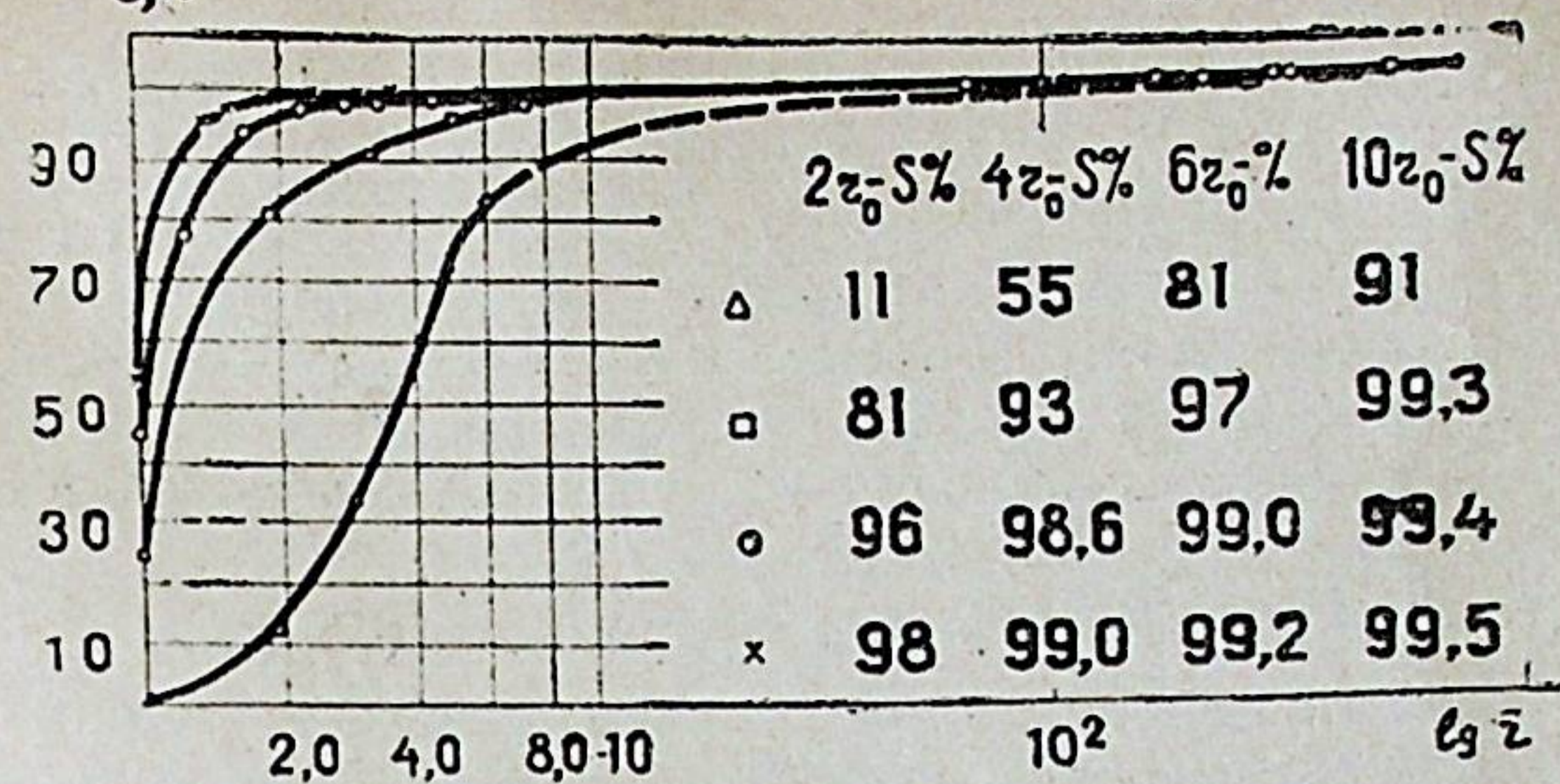


Рис. 1. Изменение относительных интегральных потерь энергии волны в глинистом алеврите в зависимости от формы заряда и расстояния (Δ — плоский фронт, \square — плоский заряд, \circ — цилиндрический, \times — сферический).

ры волн P , U , E_2 в ближней зоне зарядов различны и удовлетворяют неравенству: $P_{сф} < P_{ц} < P_{пл} < P_{пф}$;
 $U_{сф} < U_{ц} < U_{пл} < U_{пф}$; $E_{2сф} < E_{2ц} < E_{2пл} < E_{2пф}$ (6)

По мере удаления от источника взрыва параметры волн по своей абсолютной величине резко снижаются, что обусловливается различного рода потерями энергии, связанными с нелинейностью, пластичностью, вязкостью среды и геометрическим рассеянием энергии волны в пространстве.

В дальней зоне действия взрыва интенсивность изменения σ , u , E_2 снижается (табл. 4), уменьшается также и расхождение в параметрах по сравнению со сферическим зарядом. Однако энергетический уровень волн находится, как это следует из данных табл. 4, в полном соответствии с неравенством (6).

Сделанное обобщение качественно справедливо для всех исследованных сред.

Физически неравнозначное изменение параметров волн в зависимости от формы зарядов может быть объяснено на основе оценки относительных интегральных потерь энергии волны в процессе ее распространения в среде. Анализ потерь энергии в зависимости от формы зарядов показывает (рис. 1), что максимальные относительные интегральные потери S энергии наблюдаются у сферических зарядов, а минимальные у плоских зарядов и зарядов, формирующих плоский фронт. На основе учета изменения относительных интегральных потерь энергии волны в зависимости от расстояния и физико-механи-

ческих свойств пород может быть произведена и оценка энергоемкости горных пород.

По своему физическому смыслу интегральные потери выражают разность в уровнях энергии, соответствующих квазиупругому и упруго-пластическому состоянию среды на расстоянии r_i в условиях динамического взрывного нагружения.

Для определения интегральных потерь S в наиболее чистом виде, не осложненном геометрическим рассеянием энергии волны, целесообразно производить взрывное нагружение среды зарядами, формирующими плоский фронт.

При этом отсчет потерь энергии в каждом отдельном случае ведется от ее первоначального уровня $E_2^{(0)}$, определяемого для данной среды исходными значениями волновых параметров P, U, t до текущего значения энергии $E_2^{(t)}$ на расстоянии r_i .

Экспериментальная оценка энергоемкости глинистого алевролита, известняка и мрамора в ближней зоне действия взрыва в соответствии с предложенной методикой показывает, что при взрывном нагружении среды пористые, с малой акустической жесткостью, легко сжимаемые типа глинистого алевролита, более энергоемки по сравнению с такими упругими горными породами, как мрамор и известняк.

Следовательно, на основе изучения особенностей изменения в среде параметров волн представляется возможным судить не только об эффективности действия зарядов той или иной формы, но и об энергоемкости сред, что очень важно с точки зрения их классификации по взрываемости.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований по изучению особенностей распространения волн, создаваемых в различных средах зарядами разной формы, установлено, что:

1. Ввиду особенностей режимов детонации максимальные значения параметров ударных волн наблюдаются у зарядов, формирующих плоский фронт, плоских и парносближенных зарядов, а минимальные — у сферических и цилиндрических зарядов.

2. Максимальное затухание P, U, E_2 наблюдается у сферических и цилиндрических зарядов, а минимальное — у плоских, парносближенных и зарядов, формирующих плоский фронт. Отличие в параметрах с увеличением расстояния вначале растет, а затем при $r \rightarrow \infty$ уменьшается.

3. Наблюдаемое отличие в параметрах волн у зарядов различной формы на одинаковых относительных расстояниях объ-

ясняется неоднозначностью исходных параметров и законов геометрического рассеяния, в связи с чем энергетический уровень плоских волн и волн, создаваемых плоскими и парносближенными зарядами, существенно превышает энергетические уровни сферических и цилиндрических волн.

4. Отмеченные максимальные значения параметров волн у зарядов, формирующих плоский фронт, плоских и парносближенных зарядов свидетельствуют о наиболее эффективном их использовании для разрушения сред, поскольку максимальным значением P, t, E_2 соответствуют и максимальные деформации в области нагружения и в области разгрузки.

5. Эффективность применения перечисленных зарядов подтверждается также и тем, что их действие в среде сопровождается минимальными относительными потерями энергии и интенсивностью их роста по сравнению с потерями у сферических и цилиндрических зарядов.

6. Несомненное технико-экономическое преимущество методов при производстве взрывных работ плоскими и парносближенными зарядами по сравнению с обычными методами подтверждается практикой их использования на горнорудных и угольных предприятиях страны, в результате чего в среднем себестоимость буровзрывного комплекса снижается на 10—25%, выход негабарита и удельный расход ВВ уменьшается соответственно на 25% и 3,5—47%, а производительность погрузочного оборудования возрастает на ~ 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Имеющиеся в настоящее время экспериментально-теоретические исследования качественных и количественных зависимостей действия взрыва зарядов различной формы в различных средах не могут быть признаны исчерпывающими в силу того, что:

а) в рассмотренных исследованиях отсутствуют результаты сравнительного изучения действия сферических, цилиндрических и плоских форм зарядов в одних и тех же условиях, позволяющие установить эффективность применения той или иной формы;

б) проведенные исследования, за исключением водовоздушных сред, относятся в основном к расстояниям $R \geq 5 \div 10 r_0$. Между тем, наиболее существенное влияние формы заряда на распределение параметров во времени и пространстве проявляется в ближней зоне при $R < 5 r_0$. Следовательно, знание ближней зоны совершенно необходимо для изучения особен-

ностей действия зарядов различной формы и на более далеких расстояниях;

в) в современных исследованиях действия взрыва зарядов различной формы недостаточное внимание уделено изучению параметров детонации данных зарядов и изучению ударной сжимаемости среды, хотя от этих факторов во многом зависит существование волны вблизи заряда и на более далеких расстояниях.

2. В результате проведенных исследований в работе установлен ряд новых качественных и количественных зависимостей, характеризующих особенности действия взрыва зарядов различной формы в горных породах:

а) параметры детонационных волн существенно зависят от формы заряда. Различие в скоростях детонации, давлении и длине волны у зарядов равного диаметра, но разной формы по сравнению со сферическим зарядом соответственно составляет для цилиндрического заряда 27%, 123% и 150%, для плоского—33%, 146% и 235% и объясняется различными условиями и характером разлета ПВ;

б) соотношение экспериментальных значений параметров детонации в плоскости Чепмена-Жуге у зарядов различной формы позволяет считать, что плоский заряд толщиной, равной диаметру цилиндрического и сферического зарядов, при равных весах зарядов будет более эффективен с точки зрения генерирования в окружающей среде волн большей интенсивности и продолжительности. Эта большая эффективность возможна за счет более высоких давлений в плоскости Чепмена-Жуге, а также за счет более медленного спада массовой скорости за ней;

в) поведение исследованных горных пород в условиях динамического взрывного нагружения зависит от их компонентного состава и описывается уравнениями (3—5). Участие каждой из компонент в процессе сопротивления ударному сжатию определяется ее первоначальным объемным содержанием и термодинамическим состоянием в том или ином диапазоне взрывного нагружения. Полученные уравнения состояния горных пород дают возможность к определению параметров ударных волн в ближней зоне действия взрыва и к оценке упругих постоянных горных пород;

г) максимальные начальные значения параметров ударных волн на границе раздела заряд—среда наблюдаются у зарядов, формирующих плоский фронт, плоских и парносближенных зарядов, а минимальные — у сферических и цилиндрических зарядов;

д) максимальное затухание параметров P , U , E_2 наблю-

дается у сферических и цилиндрических зарядов, а минимальное — у плоских, парносближенных и зарядов, формирующих плоский фронт. Отличие в параметрах с увеличением расстояния вначале растет, а затем при $r \rightarrow$ уменьшается;

е) отмеченные максимальные значения параметров волн у зарядов, формирующих плоский фронт, плоских и парносближенных зарядов свидетельствуют о наиболее эффективном их использовании для разрушения сред, поскольку максимальным значениям P , t , E_2 соответствуют и максимальные деформации в области нагружения и в области разгрузки.

Одновременно данные заряды характеризуются минимальными относительными интегральными потерями энергии и интенсивностью их роста по сравнению с зарядами сферической и цилиндрической формы.

3. Приведенная в работе методика оценки относительных интегральных потерь энергии волны дает возможность к косвенному определению энергоемкости сред, в процессе их взрывного нагружения и разрушения зарядами, формирующими плоский фронт:

среды пористые, легкосжимаемые, с малой акустической жесткостью, типа глинистого алевролита, более энергоемки, чем среды малосжимаемые, с высокими значениями динамического предела текучести, типа мрамора.

4. Техничко-экономическое преимущество методов производства взрывных работ плоскими и парносближенными зарядами по сравнению с обычными методами подтверждается практикой их использования на горнорудных и угольных предприятиях страны, в результате чего в среднем себестоимость буровзрывного комплекса снижается на 10—25%, выход негабарита и удельный расход ВВ уменьшается соответственно на 25% и 3,5—47%, а производительность погрузочного оборудования возрастает на ~10%.

5. Основной задачей дальнейших исследований является совершенствование методических основ расчета рациональных параметров буровзрывных работ при методе с плоскими зарядами, парносближенными и зарядами, формирующими плоский фронт, на базе достижения предельного соответствия детонационных параметров ударной сжимаемости горных пород и их энергоемкости в процессе взрывного нагружения и разрушения.

Результаты выполненных исследований докладывались на сессиях Ученого совета по народнохозяйственному использованию взрыва Сибирского отделения Академии наук СССР, в Военно-инженерной Академии имени Карбышева, Филиале Института химической физики АН СССР, а также на производственно-технических совещаниях рудников и комбинатов Средней Азии.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Особенности действия зарядов различной конструкции в среде. Труды V сессии Ученого совета по народнохозяйственному использованию взрыва. Изд-во АН Киргизской ССР, 1965.

2. Влияние формы заряда на параметры детонации ПЖВ—20. Сб. Взрывное дело № 63/20. «Недра», Москва, 1967; соавторы: А. Н. Дремин, К. К. Шведов.

3. Экспериментальное исследование ударной сжимаемости некоторых горных пород. Сб. Разрушение горных пород взрывом. Изд-во «Илим», АН Кирг. ССР, 1967.

4. О возможности оценки динамических упругих постоянных горных пород на основе исследования их ударной сжимаемости. Сб. Разрушение горных пород взрывом. Изд-во «Илим», АН Кирг. ССР, 1967.

5. Методика экспериментального определения профиля фронта ударной волны в ближней зоне взрыва. Известия АН Киргизской ССР, № 5, 1967, соавторы: С. В. Першин, О. К. Розанов.

Подписано в печать 23/VI 1967 г. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Объем 1,5 п. л.
Д—04019. Заказ 1015. Тираж 250 экз.

г. Фрунзе, тип. АН Киргиз. ССР