

6
436

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
УЧЕНЫЙ СОВЕТ ПО ГЕОЛОГИИ И ГОРНОМУ ДЕЛУ

На правах рукописи

Н. А. Штейнбах

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН
НАПРЯЖЕНИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И ИХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПРОСЛОЙКАМИ

(312—открытая разработка и эксплуатация угольных, рудных
и нерудных месторождений)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Фрунзе 1970

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
УЧЕНЫЙ СОВЕТ ПО ГЕОЛОГИИ И ГОРНОМУ ДЕЛУ

На правах рукописи

Н. А. ШТЕЙНБАХ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЯ
В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПРОСЛОЙКАМИ

(312 - открытая разработка и эксплуатация
угольных, гудных и нерудных месторождений)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Фрунзе 1970

ВВЕДЕНИЕ

Перспективный план развития народного хозяйства СССР на ближайшие годы предусматривает широкое применение взрыва в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Использование взрыва при открытой разработке месторождений на большую глубину, при строительстве гидротехнических сооружений и дорог в условиях высокогорья приводит к необходимости защиты бортов карьера и склонов ущелий и каньонов от действия промышленных взрывов с целью сохранения их устойчивости. Это требует детальной разработки задач, связанных с совершенствованием существующих и разработкой новых методов ведения взрывных работ в указанных условиях. Создание рациональных методов ведения взрывных работ должно базироваться на современных теоретических и экспериментальных исследованиях действия взрыва в грунтах и горных породах.

За последние годы в СССР и за рубежом большое внимание уделяется изучению взаимодействия волн напряжения в плотных средах с преградами в связи с необходимостью защиты инженерных сооружений и обнажений горных пород в зоне действия взрыва (50-60 радиусов заряда). Для грунтов в этом направлении значительные исследования проведены Б.А.Олисовым, С.С.Григоряном, Г.М.Ляховым и Н.И.Поляковой, К.П.Станьковичем, Н.В.Зволинским, Ю.С.Яковлевым, К.В.Николаевым, З.В.Нарошной и др.

Для горных пород известны исследования В.И.Мосинца, Е.Г.Баранова, А.А.Вовка и Г.И.Черного, В.П.Леонтьева, В.П.Улыбина, Д.Райхардта, Л.Гуннара и др.

Однако исследования в горных породах носят в значительной мере экспериментальный характер и не позволяют получить обобщений пригодных для разработки инженерных методов проектирования и производства взрывных работ в специфических условиях. Подобные обобщения возможны на основе комплексного экспериментально-теоретического решения задачи. Это и определило цель диссертационной работы:

- теоретическое исследование распространения волн напряжений в горных породах и их взаимодействия с экранирующими прослойками;
- экспериментальное изучение взаимодействия волн с прослойками;
- разработка практических рекомендаций по использованию теоретических и экспериментальных зависимостей.

В соответствии с поставленной целью основные задачи исследования включали:

1. Анализ имеющихся результатов исследований по распространению волн напряжения в горных породах.
2. Теоретическое исследование распространения волн напряжения в неоднородных породах с различной сжимаемостью.
3. Теоретическое изучение взаимодействия волн с прослойками в упругой и упруго-пластической средах.
4. Экспериментальное исследование экранирующего действия прослоек в массиве горных пород.
5. Разработка практических рекомендаций по использованию полученных зависимостей для ослабления действия взрыва на сооружения, для сохранения устойчивости обнажений массивов горных пород, для оценки влияния нарушенности массива от действия

предыдущих взрывов на параметры волн напряжений.

Диссертационная работа содержит обобщение, теоретическое исследование, натурный эксперимент, статистическую обработку результатов эксперимента и номографический метод расчета параметров взрывных работ.

Работа выполнена в Отделе "Физики взрыва" Института физики и механики горных пород АН Киргизской ССР в течение 1967-1970 гг. Экспериментальные исследования проведены на руднике Сумсар треста "Главцинквинцолово" МЦМ СССР.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и рекомендаций, изложенных на 120 страницах машинописного текста с 12 таблицами и включает 43 рисунка, список использованной литературы.

ГЛАВА I

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЯ В ПЛОТНЫХ ОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Обзор работ по исследованию распространения волн напряжений в плотных однородных средах показывает, что различные авторы моделируют эти среды различным образом. Основная часть имеющихся решений относится к плоскому одномерному движению. Общие аналитические методы решения волновых задач с произвольным напряженным состоянием плотных сред до сих пор не разработаны.

Экспериментальные исследования распространения волн в горных породах не позволяют исчерпывающим образом обосновать применение к ним одной какой-то модели. Для горных пород до

сх пор не существует единой физически обоснованной модели. Здесь пользуются чаще всего методом аналогий и введением в известные модели сред некоторых условий и допущений, учитывающих сжимаемость горных пород, их пластичность и вязкость. Учет этих факторов обусловлен тем, что распространение волн в горных породах не описывается законами линейной теории упругости. Построение модели горной породы сводится к определению уравнений, описывающих поведение среды при динамических процессах.

Определение динамических характеристик горных пород, исходя из условий их сжимаемости или закона затухания амплитуд взрывных волн — сложная математическая задача. Экспериментальные исследования по динамическому нагружению горных пород показали, что деформация зависит не только от напряжения, но и от скорости деформирования, что указывает на наличие вязко-пластических свойств среды. На основании анализа существующих теоретических и экспериментальных исследований установлено, что к горным породам применима модель упруго-пластической среды с учетом вязкости.

Вязкие и пластические свойства приблизительно могут быть оценены по интенсивности затухания волн. Однако, учет вязкости приводит к значительному усложнению решения волновых задач. Экспериментальные исследования различных авторов показывают, что некоторые волновые задачи, в частности, взаимодействие волн с прослойками и преградами, могут рассматриваться в первом приближении без учета вязкости.

Приближенное решение волновых задач в указанной постановке позволяет получить качественную и количественную оценку пара-

метров. С возрастанием скорости деформирования зависимость $\sigma(\varepsilon)$, соответствующая нагрузке, становится близкой к линейной.

Анализ теоретических исследований распространения волн напряжений в горных породах показывает, что характер изменения параметров волн в функции расстояния и формы заряда может быть определен только в общем виде:

$$\rho = A_i (\bar{r})^{n_i} \quad (I)$$

$i = 1, 2, 3$ (для плоской, цилиндрической и сферической волн); A_i и n_i из теоретических исследований получаются приближенно. Истинные значения A_i и n_i для конкретных условий (пород, ВВ и т.д.) определяются экспериментально.

Установлено, что затухание волн напряжений в горных породах связано с наличием касательных напряжений и зависимостью диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ от скорости деформации. Эксперименты показывают, что обычно с возрастанием акустической жесткости пород (известняк, сланцы, доломиты, гранит, мрамор и т.д.) происходит уменьшение интенсивности затухания волн с расстоянием. Установлено, что показатель затухания волн напряжений в горных породах меняется в широком диапазоне значений $1,1 - 1,2 \leq n \leq 2,6 - 2,8$.

ГЛАВА II

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ С ВОЗРАСТАЮЩЕЙ СЖИМАЕМОСТЬЮ

При ведении взрывных работ в неоднородных горных породах, неоднородность которых может проявляться либо четко выраженными изменениями свойств от слоя к слою или непрерывными

изменяем свойство, волна напряжения распространяется по среде с меняющейся сжимаемостью. Известно, что при взрывах на неубранную горную массу волна, создаваемая взрывом очередного ряда зарядов, сначала движется по среде с возрастающей сжимаемостью, затем переходит в среду с постоянной, но еще большей сжимаемостью. При этом на границе сжимаемость возрастает скачком, а волна на некотором удалении от взрыва в первом приближении может рассматриваться как плоская. Г.М. Лиховым получено решение при распространении ударной волны в среде с непрерывно уменьшающейся сжимаемостью. Разгрузка принята происходящей при постоянном объеме.

Изучение плоских одномерных движений плотных сред в диссертации проводится в переменных Лагранжа.

Распространение плоских одномерных волн в средах с непрерывно меняющимися свойствами теоретически изучалось Н.Пезиной, С.С.Давыдовым, Я.Осецким.

Распространение ударной волны по среде с непрерывно возрастающей сжимаемостью рассмотрено нами в координатах Лагранжа h, t ; линия нагрузки принята прямой, разгрузка происходит при постоянном объеме. Изменение акустического сопротивления среды с глубиной принято линейным:

$$A(h) = A_1 + \alpha h,$$

где A_1 - акустическая жесткость в начальном сечении среды, α - характеристика степени неоднородности среды.

В указанной постановке дается решение задачи о распространении ударной волны по среде с непрерывно меняющейся сжимаемостью и для сопоставления дано решение о переходе волны из одной пластической среды в другую упругую или пластическую среду.

Результаты расчета параметров на фронте волны при ее распространении в неоднородной и однородной пластических средах, приведенные на рис. 1, позволяют заключить, что в неоднородной пластической среде с $\alpha < 0$ давление на фронте волны убывает с расстоянием быстрее, чем в однородной пластической среде ($\alpha=0$), сравнивая графики 1 и 3.

Скорость частиц имеет большие значения в неоднородной среде. Чем больше неоднородность среды, тем интенсивнее убывает давление с расстоянием. В сечении h'' давление падает скачком, а потом остается неизменным на фронте, т.к. вторая среда линейно упругая. Скорость частиц $\frac{A, u}{P_m}$ на фронте равна $\frac{P}{P_m}$, поэтому графики скорости частиц и давления в однородной среде при $h < h''$ совпадают. Во второй среде, т.е. при $h > h''$ скорость частиц сохраняет значение, соответствующее сечению h'' . Она обозначена пунктирной линией 3^I. Из сопоставления графиков 3 и 1 следует,

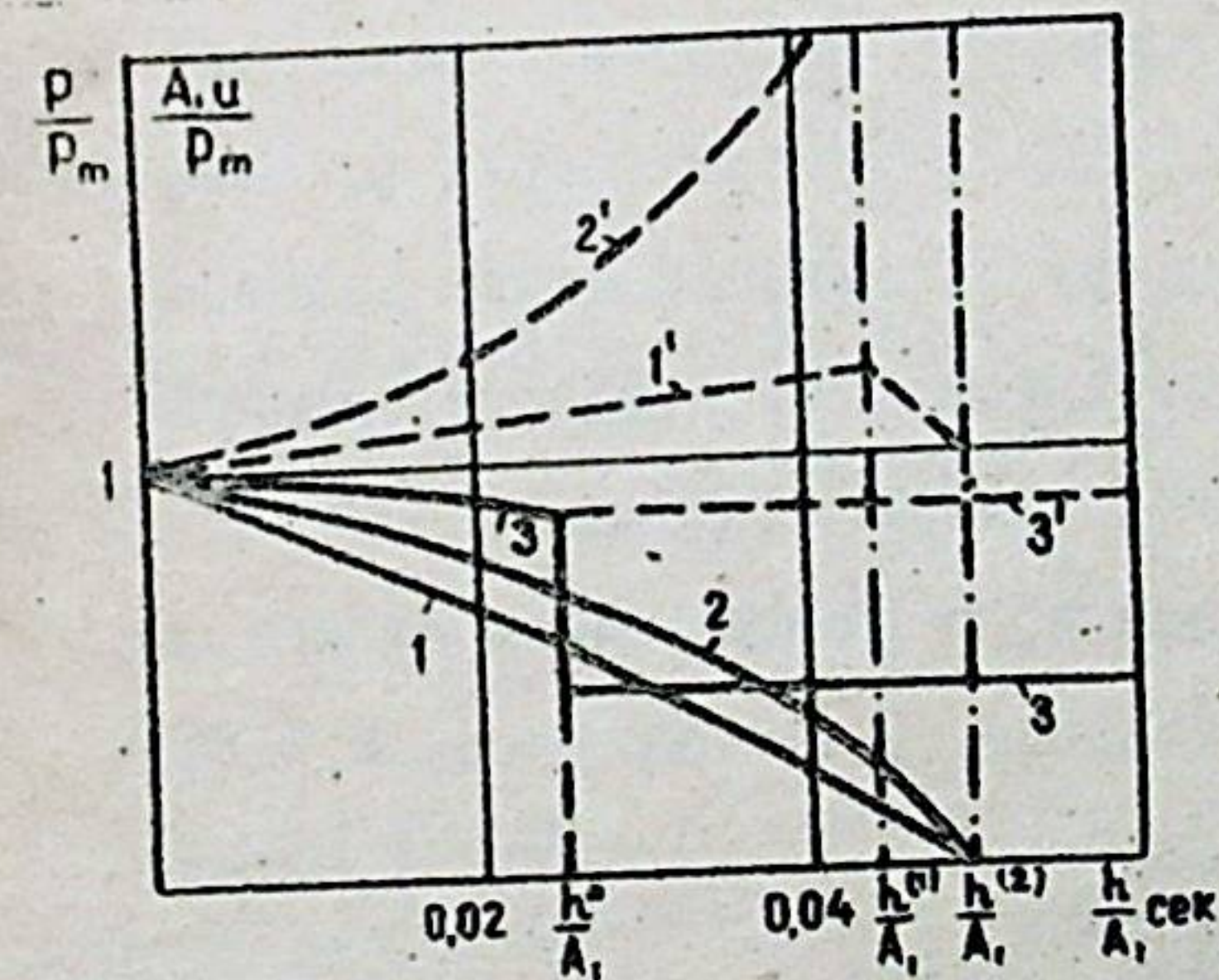


Рис. 1. Изменение параметров на фронте волн для различных сечений пластической среды:
1 - давление в неоднородной среде при $\theta = 0,1$ сек;
1' - скорость в неоднородной среде при $\theta = 0,1$ сек;
2 - давление в неоднородной среде при $\theta = 1,0$ сек;
2' - скорость в неоднородной среде при $\theta = 1,0$ сек;
3 - давление в однородной среде при $\theta = 0,1$ сек;
3' - скорость в однородной среде при $\theta = 0,1$ сек

что при движении волны по среде с непрерывно возрастающей сжимаемостью давление на фронте падает в меньшей степени, чем при непосредственном переходе волны из слоя с акустическим сопротивлением A_1 в слой с $A_2 = \frac{A_1}{2}$. На основе проведенных в главе исследований получены зависимости, позволяющие определить параметры волн напряжений при их распространении в среде с различной сжимаемостью и при переходе из среды с меньшей сжимаемостью в среду с постоянной, но еще большей сжимаемостью. Практические рекомендации по использованию некоторых результатов расчета приведены в главе У.

ГЛАВА Ш

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЯ С ПРОСЛОЙКАМИ

Производство взрывных работ в непосредственной близости от объектов (инженерных сооружений, плотин, тоннелей, подземных выработок) связано с необходимостью снижения параметров взрывных волн при сохранении веса взрываемых зарядов. Снижения параметров волн можно достигнуть созданием между взрывом основного заряда и защищаемым объектом искусственной прослойки с большей сжимаемостью, чем у основной среды.

Исследования распространения волн напряжений в слоистых средах посвящен ряд работ Б.А.Олисова, С.С.Григоряна, К.П.Станковича, Г.М.Ляхова и Н.И.Поляковой, С.Калисского, Я.Осецкого, Э.В.Нарошной, Г.Л.Хесина, И.Х.Костина.

В диссертации рассматривается прохождение непрерывной плоской взрывной волны через среду с прослойкой, определяются

значения давления P и скорости смещения частиц U в прослойке и в областях прослойки и за ней. Ранее подобное решение имелось только для ударной волны.

Решение выполнено при помощи метода, разработанного Г.М.Ляховым и Н.И.Поляковой. Этот метод основан на том, что функция, выражающая закон сжимаемости $P = P(V)$ заменяется ломаной со следующими видами:

$$P = -A^2 V + B \quad (2),$$

где A и B — постоянные величины в пределах данного звена ломаной.

При условии (2) система основных уравнений динамики сплошной среды в координатах Лагранжа

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial h} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial h} - \frac{\partial V}{\partial t} = 0$$

сводится к однородному волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 P}{\partial h^2} = \frac{1}{A^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (4)$$

Решение уравнений (4) имеет вид:

$$P = F_{1i}(h - At) + F_{2i}(h + At) \quad (5)$$

$$U = \frac{1}{A} [F_{1i}(h - At) - F_{2i}(h + At)]$$

Функции F_{1i} и F_{2i} определены из начальных и граничных условий, выражающих заданную зависимость $P(t)$ при $h = 0$

$$P = P_m \frac{t}{\tau}, \quad 0 \leq t \leq \tau$$

$$P = P_m \left(1 - \frac{\tau - t}{\tau - \theta}\right), \quad \tau \leq t \leq \theta \quad (6)$$

здесь τ - время нарастания давления от 0 до максимума;
 θ - время существования положительной фазы волны напряжения, - на линии $h = A_1 t$ выполняется $P = A_1 U$

Кроме того, на границах сред с различными акустическими жесткостями выполняются условия равенства давлений и скоростей частиц. Используя заданные начальные и граничные условия, определены зависимости для P и U в различных областях.

Анализ полученных зависимостей позволил установить, что значение давления в отраженной от прослойки и проходящей волнах в значительной степени зависит от отношения акустических сопротивлений основной среды A_1 и прослойки A^* и временных параметров падающей волны. С изменением отношения $\frac{A^*}{A_1}$ (с 0,2 до 0,5) давление в проходящей через прослойку волне увеличивается в 2 раза, в отраженной от прослойки волне происходит уменьшение давления.

При изучении закономерностей распространения волн в среде с прослойками наибольший интерес представляют решения в областях за прослойкой.

Из зависимостей давления и скорости смещения частиц от времени при различных соотношениях $\frac{A^*}{A_1}$, τ и θ следует, что экранирующие прослойки наиболее эффективны на близких расстояниях от места взрыва при сравнительно малых длинах волны. Параметры на фронте волны за прослойкой могут быть снижены в 1,5-2,5 раза по сравнению с соответствующими значениями при взрывах в сплошном массиве. На рис. 2 приведены зависимости давления в волне за прослойкой от ширины прослойки и расстояния для двух разных отношений акустических сопротивлений прослойки и основной среды.

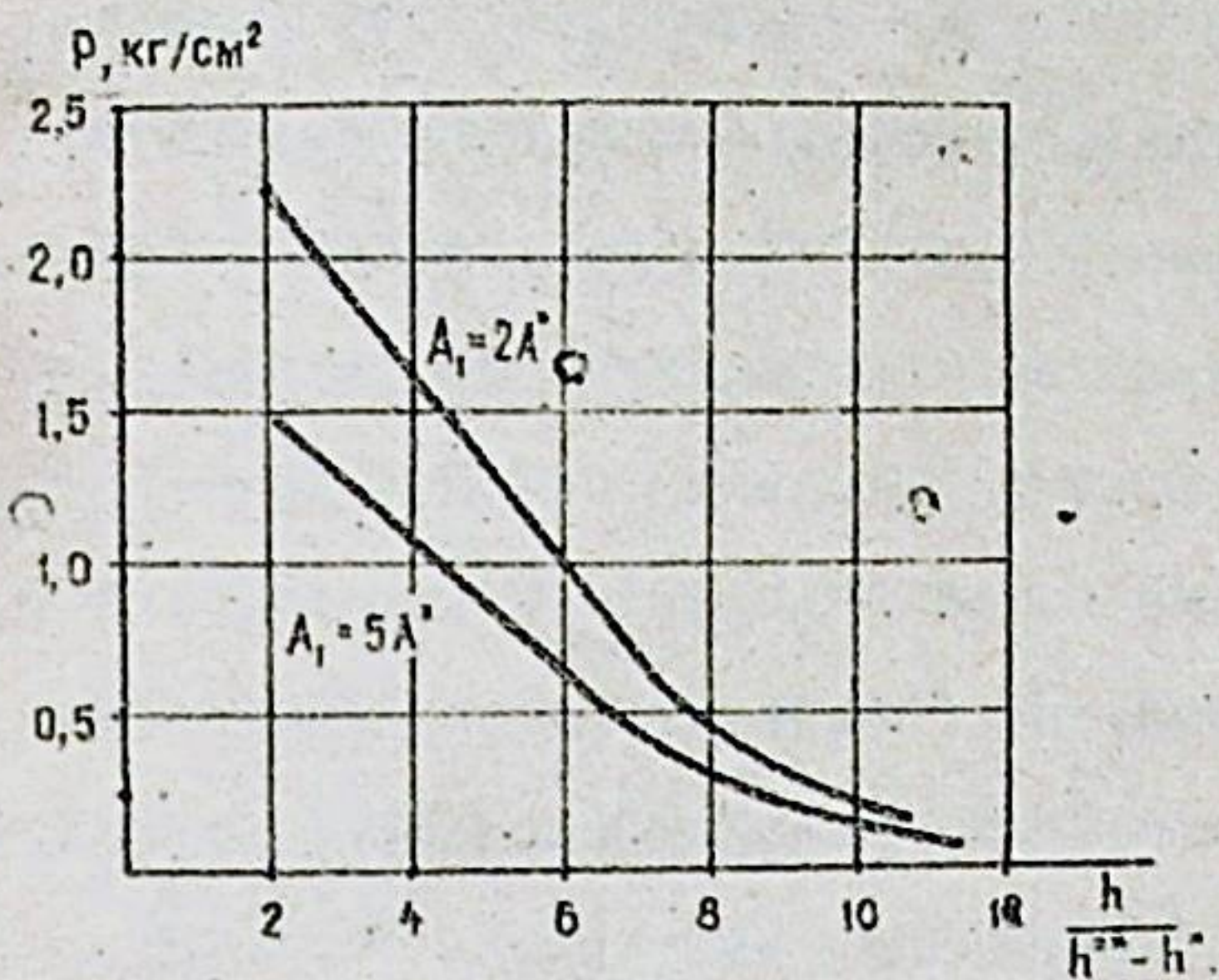


Рис. 2. Изменение давления на фронте волны за прослойкой:
 h - текущая координата Лагранжа;
 $h^* - h^*$ - ширина прослойки

Из сравнения зависимостей $P = P(t)$ при прохождении волны через границу сред упругих и упруго-пластических следует, что падение давления происходит более интенсивно в упруго-пластической среде, что указывает на влияние пластических свойств.

ГЛАВА IV

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКРАНИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРОСЛОЕК В МАССИВЕ

Для оценки действия экранирующих прослоек в массиве, установления количественных зависимостей параметров волн напряжения при распространении в среде с прослойками и сопоставления теоретических исследований с экспериментальными данными проведены эксперименты в массиве горных пород.

Полученное выше теоретическое решение задач показало, что изменение давления на фронте волны и скорости смещения частиц за прослойкой существенно зависит от отношения акустических жесткостей двух сред, относительной ширины прослойки.

Экспериментальные работы проведены в доломитах месторождения Сумсар (Киргизия). Определение параметров волны напряжений в массиве проводили путем регистрации скорости смещения вибрографами и осциллографами Н-102. Экранирующие прослойки в массиве доломитов создавали путем взрывания серии зарядов с заданными расстояниями между ними и удельным расходом ВВ в шпурах, пробуренных в стенке выработки высотой 2,0-2,2 м. Эксперименты проведены в три этапа. На первом этапе определяли закон затухания волны напряжения (в пределах исследуемого участка массива) в зависимости от приведенного расстояния $\bar{R} (\bar{R} = \frac{R}{\sqrt{Q}})$, вес основного заряда составлял 1 кг.

На втором этапе производили взрывание зарядов экранирующих прослоек для создания в среде разрушенного слоя. Затем взрывали основные заряды и фиксировали скорость смещения на различных расстояниях от прослоек. Основные заряды помещали в шпур глубиной 2,0 м и диаметром 60 мм. ВИБы устанавливали в нишах (по два в каждой) на глубину 1,5-1,6 м. Экранирующие прослойки создавались взрывом серии зарядов в шпурах, пробуренных на глубину 2,5 м с различным расстоянием a между шпурами ($a = 13d, 11d, 9d, 7d, 5d, d$ - диаметр шпура, 60 мм). Шпуры экранирующей прослойки бурили параллельно друг другу. Удельный расход ВВ для всей серии составлял 0,4 кг/пог.м.

На третьем этапе изменяли удельный расход ВВ в шпурах прослойки ($q = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ кг/пог.м), а расстояние между шпурами сохраняли постоянным, $a = 10d$. Каждый взрыв регистрировался в четырех точках (на различных расстояниях). Регистрацию скорости смещений проводили по горизонтальной составляющей. Сигналы от вибрографов по кабелям поступали на ос-

циллограф Н-102, установленный в специально оборудованной нише. Запуск осциллографа и производство взрыва осуществляли синхронно, через реле времени. Расчет параметров волны напряжения производили по максимальной амплитуде скорости смещений.

Ширину экранирующей прослойки определяли методом гамма-гамма-каротажа (ГГК). Исследование плотности с помощью γ - излучения основано на использовании закономерностей взаимодействия γ - квантов с веществом. Разрушенная прослойка сопоставляется с интервалами меньшей плотности, которые на диаграмме ГГК выделяются увеличением рассеянного γ - излучения.

Необходимое количество экспериментов определяли из условий получения коэффициента вариации 10-15%. При оценке полученных в результате экспериментов данных учитывалось, что точность их зависит от погрешностей приборов, измерения, обработки осциллограмм. Предельная средняя квадратичная погрешность полученных данных составила $\approx 13\%$. По средней квадратичной погрешности определена доверительная вероятность, используемая для установления необходимого числа измерений.

На первом этапе работ были установлены зависимости параметров волны напряжения от приведенного расстояния при взрывах в сплошном массиве. Обработка экспериментальных данных позволила установить зависимости скорости смещения и напряжения от приведенного расстояния в виде:

$$U = 190 \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,74}$$

$$\sigma = 50 \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,70} \quad (7)$$

Из анализа зависимостей (7) следует, что волны напряжения

в доломитах с расстоянием угасают более интенсивно, чем в воде и в граните, но менее интенсивно, чем в водонасыщенном грунте и в воздухе. Это, вероятно, обусловлено затратами энергии в ближней зоне и наличием вязких свойств в области меньших давлений.

На втором этапе исследований основной заряд взрывали через несколько часов после взрыва зарядов создающих экранирующую прослойку. В результате исследований установлена зависимость скорости смещения от параметра $k = \frac{R \cdot a/d}{\frac{A_1}{A_2} \sqrt[3]{a}}$ в виде:

$$U = Ak^n \quad (8)$$

$\frac{A_1}{A_2}$ - отношение акустических сопротивлений прослойки и основной среды.

Значения A , n и $\frac{a}{d}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

a/d	A	n
11; 13	$2,5 \cdot 10^5$	- 1,80
9	$6,95 \cdot 10^3$	- 1,47
5; 7	915,8	- 1,31

Анализ экспериментальных данных по распространению волн напряжений в массиве без прослойки и с прослойками показывает, что в экранирующей прослойке происходит снижение скорости продольной волны с 2500-3000 м/сек до 450-700 м/сек, т.е. в 3-5 раз.

Кроме того, наблюдается увеличение времени действия волны. Время существования положительной фазы волны увеличивается в 1,5-1,8 раза для различных прослоек в сравнении со средой без прослойки. Акустические сопротивления прослоек в 2-5 раз

ниже акустического сопротивления основного массива. Оптимальным расстоянием между зарядами при создании экрана и при котором происходит значительное уменьшение скорости смещения и напряжения (в 2-3 раза), является расстояние равное девяти диаметрам заряда. При уменьшении расстояния между зарядами экранирующей прослойки с 9 до 7 d , т.е. при увеличении объемов бурения, наблюдается незначительное изменение параметров волны.

На третьем этапе экспериментальных исследований экранирующие прослойки создавали при различном удельном расходе ВВ в шпурах, т.к. определение оптимального удельного расхода ВВ имеет не меньшее значение, чем определение оптимального расстояния между шпурами экрана. По результатам этого этапа исследований получены зависимости параметров волны напряжений от параметра k .

Для скорости смещения эти зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned} U &= 1,74 \cdot 10^4 k^{-1,56}, \quad \frac{a}{d} = 10; \quad q = 0,4 \text{ кг/пог.м;} \\ U &= 1,9 \cdot 10^4 k^{-1,70}, \quad \frac{a}{d} = 10; \quad q = 0,5 \text{ кг/пог.м;} \\ U &= 1,19 \cdot 10^3 k^{-1,43}, \quad \frac{a}{d} = 10; \quad q = 0,6 \text{ кг/пог.м;} \end{aligned} \quad (9)$$

Из анализа полученных данных следует, что наибольшее снижение скорости смещения (в 3,5-4 раза) за экранирующей прослойкой наблюдается при взрыве зарядов в прослойке с удельным расходом 0,6 кг/пог.м. Интенсивное снижение скорости смещения при этом наблюдается на расстояниях до 9 k , в промежутке от 9 k до 18 k - скорость смещения изменяется незначительно, а выше 18 k независимо от удельного расхода ВВ в зарядах прослойки скорость смещения практически не меняется. Следовательно, эффективное действие экранирующей прослойки

при обоих способах ее создания (а) при $\frac{a}{d}$ - различных, $q = \text{const}$, б) $\frac{a}{d} = \text{const}$, q - меняющихся) сказывается до расстояний $\approx 18k$, после чего применение экранирующих прослоек нецелесообразно.

Напряжение и скорость смещения частиц за прослойкой снижаются в экспериментах в 2-3 раза по сравнению с соответствующими значениями при взрывах в сплошном массиве. На рис. 3 представлена зависимость напряжения от приведенного к ширине прослойки расстояния для различных прослоек.

Сопоставление результатов экспериментальных данных с теоретическими расчетами показало, что основные выводы из теоретических расчетов получили удовлетворительное подтверждение.

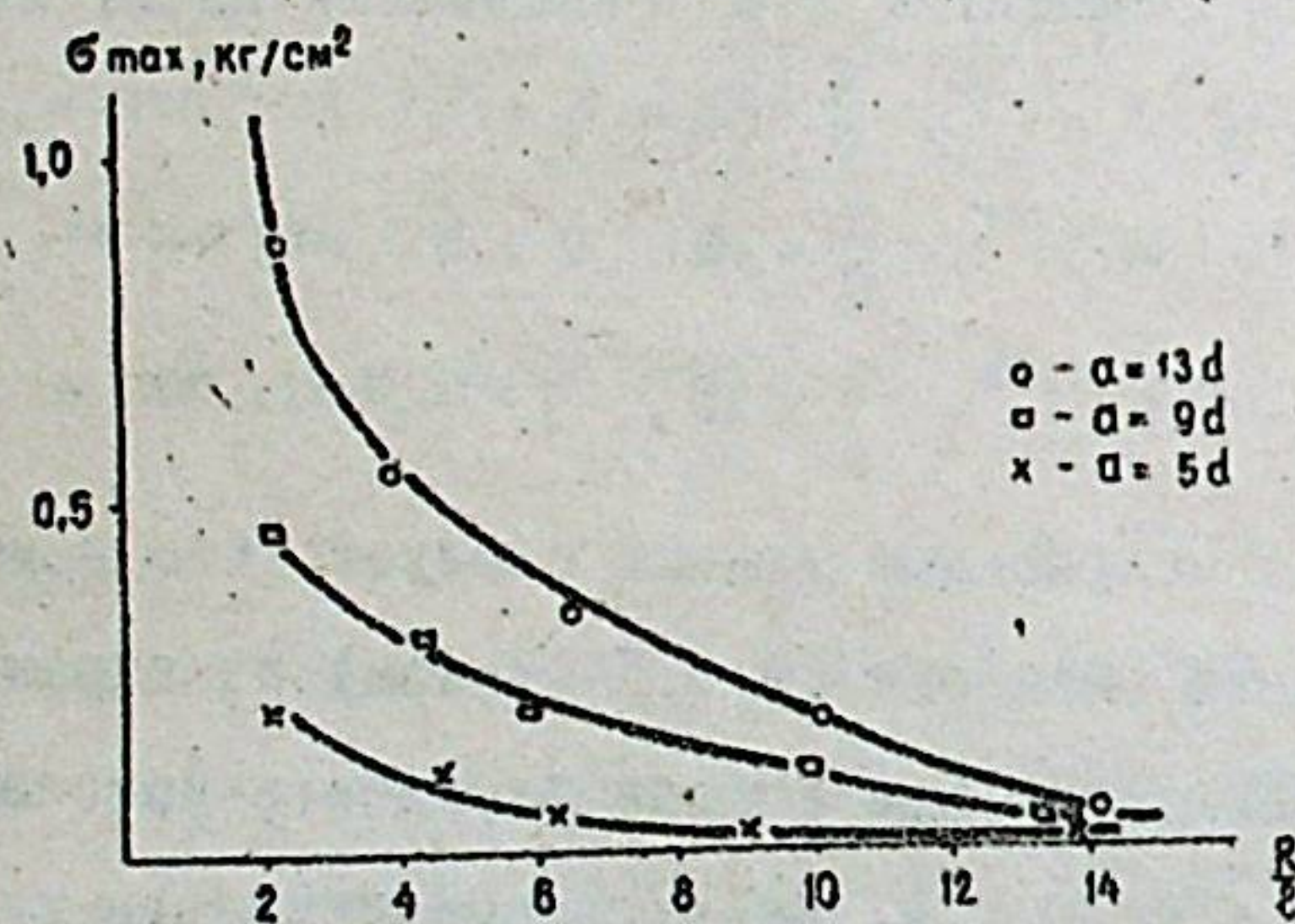


Рис. 3. Изменение напряжения на фронте волны за прослойкой:
 R - расстояние от взрыва до точки наблюдения, м; l - ширина экранирующей прослойки, м

ГЛАВА У

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В РАБОТЕ

За последние годы в СССР и за рубежом уделяется все большее внимание исследованию распространения и экранирования волн напряжения при производстве взрывных работ. Методы экранирования волн напряжения при производстве взрывных работ и методики расчета их параметров, предлагаемые различными авторами, основаны на экспериментальных зависимостях. В предлагаемой работе приведена методика расчета параметров экранирующих прослоек, основанная на использовании теоретических и экспериментальных зависимостей.

Расчет допустимой скорости смещения возможен на основе использования общей модели деформации горных пород как сплошной упруго-пластической среды. В зависимости от ответственности горнотехнических объектов, определяемой их назначением и сроком эксплуатации В.Н. Мосинец приведена шкала классификации сплошных сред по их допустимой относительной деформации в пределах упругости (табл. 2).

В случае, когда среда деформируется в пределах указанной относительной деформации, ее устойчивость может быть гарантирована, при превышении указанной величины ϵ_0 устойчивость приобретает вероятностный характер. Необходимым и достаточно надежным условием сохранения устойчивости горных пород является:

$$U \leq U_0 \quad (10),$$

где U - скорость смещения горных пород, возбуждаемая взрывом, см/сек;

U_0 - безопасная скорость смещения горных пород из условий их упругой деформации, см/сек.

Таблица 2

Классификация сплошных сред и сооружений по их относительной деформации

Класс сооружений	Срок эксплуатации и характеристики сооружений	Допустимая относительная деформация,
I	Особо ответственные сооружения длительного срока эксплуатации (более 10 лет): гидротехнические тоннели, стволы шахт, капитальные штольни, подземные камеры дробления, водохранилища	0,0001
II	Ответственные сооружения со сроком эксплуатации 5-10 лет, обводные и транспортные тоннели гидротехнических сооружений, надкамерные целики, квершлагги, уступы карьеров, отвалов	0,0002
III	Неответственные кратковременные эксплуатационные сооружения (до 1 года), камеры, уступы, шторки.	0,0003

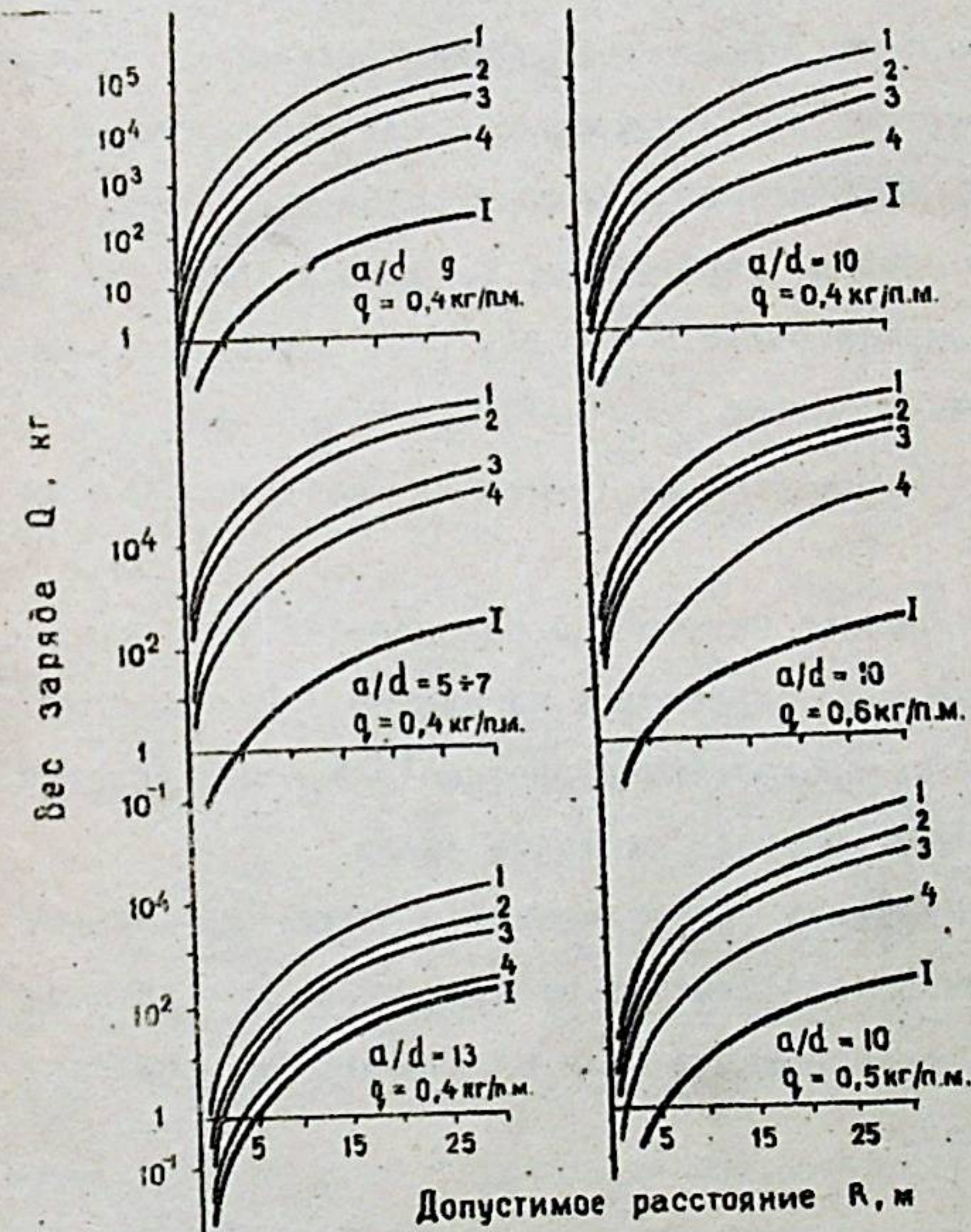
Безопасная скорость смещения, исходя из условий деформации горных пород в пределах упругости определена из зависимости:

$$U_0 \leq \frac{0,125 C_p (1-\mu) \left[\left(1 + (1-2\mu) \epsilon_0 \right)^{8/3} - 1 \right]}{(1-\mu) \left[1 + (1-2\mu) \epsilon_0 \right]^4} \quad (II)$$

где C_p - скорость распространения продольной волны, м/сек;
 μ - коэффициент Пуассона;
 ϵ_0 - допустимая относительная деформация горных пород в пределах упругости, принимаемая в соответствии с данными таблицы 2.

Допустимая скорость смещения для пород рудника Сумсар из условий получения упругой деформации $\epsilon_0 = 0,0002$ равна ≈ 14 см/сек.

Скорость смещения горных пород, определяемая при взрыве зарядов ВВ из (7), может быть снижена до допустимой скорости за счет использования экранирующих прослоек. По допустимой скорости смещения U_0 и формулам (7) и (8) определяются безопасный вес заряда и допустимое расстояние при условии сохранности инженерных сооружений и обнажений горных пород, находящихся на пути распространения взрывных волн. Для различных соотношений акустических сопротивлений



1 - взрыв в сплошном массиве
 1 - $A_1/A_2 = 0,05$ 3 - $A_1/A_2 = 0,1$
 2 - " - " = 0,08 4 - " - " = 0,2

Рис. 4. Номограмма расчета допустимого заряда ВВ в зависимости от расстояния и параметров прослоек

экранирующей прослойки A_1 и основного массива A_2 , соответственно равных $\frac{A_1}{A_2}$ (0,05; 0,08; 0,1; 0,2) на основании (7) - (9) построена номограмма (рис. 4), позволяющая определить параметры взрывных работ (безопасный вес заряда, расстояние между шпурами экранирующей прослойки, удельный расход в зарядах прослойки и др.).

Из номограммы видно, что эффективное действие экранирующих прослоек наблюдается до 18-20 м, после чего увеличение веса заряда происходит незначительно; начиная с расстояний 28-30 м вес заряда при различных параметрах экранирующих прослоек практически стабилизируется. При создании в среде экранирующей прослойки $\frac{d}{d} = 9$, $q = 0,5$ кг/пог.м и соотношениях $\frac{A_1}{A_2} = 0,1$ величина допустимого заряда, взрываемого на экранирующую прослойку, может быть увеличена более чем в сто раз. Оптимальные параметры экранирующих прослоек $\frac{d}{d} = 9-10$; удельный расход ВВ в зарядах экрана $q = 0,5$ кг/пог.м, отношение акустических жесткостей $\frac{A_1}{A_2} = 0,2$.

Предложенная в работе методика и разработанная на ее основе номограмма позволяют определить параметры буровзрывных работ в зависимости от конкретных горно-геологических условий и известной допустимой скорости смещения среды.

Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили установить возможные области и условия применения методов экранирования волн напряжений при решении ряда инженерных задач.

I. Оценка влияния естественных нарушений (трещин) на степень ослабления действия взрыва в условиях строительства Токтогульской ГЭС.

Проведение взрывов в склоне каньона Токтогульской ГЭС приводит к опасности нарушения устойчивости некоторых массивов и блоков горных пород. Наибольшую опасность представляет потенциально неустойчивый массив 46-R-7, отчлняющийся от основного массива круто падающими трещинами I66 и 995-а. Трещины могут служить экранирующими прослойками, при проведении взрывных работ. Допустимая скорость смещения для массива 46-R-7 из условий деформации горных пород при $\epsilon_0 = 0,0001$ составила $\approx 7,3$ см/сек.

Скорость смещения горных пород, наблюдаемая за трещиной, определена из зависимостей, полученных выше. Приравниванием скорости смещения за трещиной допустимой скорости, определены допустимые веса зарядов и расстояния при условии сохранения устойчивости массива.

Из полученных данных следует, что экранирующее действие трещины существенно на расстояниях до 40-50 м; далее трещина не оказывает заметного влияния на параметры заряда. Из приведенных расчетов следует, что трещины могут быть использованы в качестве экранирующих прослоек и оказывать существенное влияние на увеличение допустимого веса заряда при условии сохранения устойчивости массива и его отдельных блоков.

2. Оценка влияния нарушенности массива действием предыдущих взрывов на параметры волн напряжений.

Известно, что при распространении волны напряжения в массиве последняя встречает на своем пути ряд зон, характеризующихся различной степенью нарушенности пород. Параметры на фронте волны при ее движении по неоднородной среде могут быть определены из полученных в работе зависимостей для P и U при заданных граничных условиях. Одним из параметров, входящих в

граничные условия, является скорость продольной волны в массиве, которая может быть положена в основу метода оценки состояния массива на различных расстояниях от источника взрыва. Этот метод нашел применение в оценке состояния склонов после взрыва на Байпазинском водохранилище.

3. Оценка параметров волн напряжения при взрывании на неубранную горную массу

Взрывание на неубранную горную массу получает все большее распространение как один из активных способов управления взрывом при разработке месторождений полезных ископаемых. Качественная картина процесса отбойки на неубранную горную массу является подтверждением аналитических зависимостей главы II. По измеренным значениям C_p представляется возможным рассчитать параметры волн напряжения в массиве и на границе раздела массив-взорванная горная масса.

Использование предложенной в работе методики расчета параметров экранирующих прослоек и аналитических зависимостей изменения параметров волн от расстояния при их распространении в неоднородных средах для решения различных инженерных задач, позволило установить, что действие экранирующих прослоек наиболее эффективно до 18-20 м, после чего увеличение допустимого веса заряда происходит незначительно; на расстояниях свыше 28-30 м вес допустимого заряда при различных параметрах прослойки практически не меняется.

Использование естественных нарушений (трещин) в качестве экранирующих прослоек при проведении взрывных работ в блоке 46-R-7 Токтогульского гидроузла позволяет увеличить допусти-

мые величины зарядов в 10-100 раз при условии сохранения устойчивости массива.

Выводы и рекомендации

I. При разработке месторождений полезных ископаемых карьерами большой глубины, подземной разработке сложных рудных тел в неустойчивых вмещающих породах, строительстве гидротехнических сооружений и дорог в условиях высокогорья наряду с требованиями к качественному дроблению массива возникает необходимость обеспечения сохранности и устойчивости обнажений, образованных горными работами. Для этих целей широко применяются различные методы экранирования волн напряжений созданием в среде искусственных экранирующих прослоек. Однако, названные методы основываются на экспериментальных зависимостях и не являются исчерпывающими.

2. Исходя из решения основных уравнений динамики сплошной среды и при различных методах линеаризации диаграммы ϵ (путем представления ее в виде кусочно-линейных функций) в диссертации решены задачи:

- а) распространение волн напряжения в средах с возрастающей сжимаемостью;
- б) прохождения непрерывной волны напряжения в упругих средах с прослойками;
- в) перехода волны напряжения из одной упруго-пластической среды в другую упруго-пластическую среду с большей сжимаемостью.

При этом показано, что при распространении волны в среде с возрастающей сжимаемостью происходит уменьшение параметров

граничные условия, является скорость продольной волны в массиве, которая может быть положена в основу метода оценки состояния массива на различных расстояниях от источника взрыва. Этот метод нашел применение в оценке состояния склонов после взрыва на Байпазинском водохранилище.

3. Оценка параметров волн напряжения при взрывании на неубранную горную массу

Взрывание на неубранную горную массу получает все большее распространение как один из активных способов управления взрывом при разработке месторождений полезных ископаемых. Качественная картина процесса отбойки на неубранную горную массу является подтверждением аналитических зависимостей главы II. По измеренным значениям C_p представляется возможным рассчитать параметры волн напряжения в массиве и на границе раздела массив-взорванная горная масса.

Использование предложенной в работе методики расчета параметров экранирующих прослоек и аналитических зависимостей изменения параметров волн от расстояния при их распространении в неоднородных средах для решения различных инженерных задач, позволило установить, что действие экранирующих прослоек наиболее эффективно до 18-20 м, после чего увеличение допустимого веса заряда происходит незначительно; на расстояниях свыше 28-30 м вес допустимого заряда при различных параметрах прослойки практически не меняется.

Использование естественных нарушений (трещин) в качестве экранирующих прослоек при проведении взрывных работ в блоке 46-R-7 Токтогульского гидроузла позволяет увеличить допусти-

мые величины зарядов в 10-100 раз при условии сохранения устойчивости массива.

Выводы и рекомендации

I. При разработке месторождений полезных ископаемых карьерами большой глубины, подземной разработке сложных рудных тел в неустойчивых вмещающих породах, строительстве гидротехнических сооружений и дорог в условиях высокогорья наряду с требованиями к качественному дроблению массива возникает необходимость обеспечения сохранности и устойчивости обнажений, образованных горными работами. Для этих целей широко применяются различные методы экранирования волн напряжений созданием в среде искусственных экранирующих прослоек. Однако, названные методы основываются на экспериментальных зависимостях и не являются исчерпывающими.

2. Исходя из решения основных уравнений динамики сплошной среды и при различных методах линеаризации диаграммы $\sigma(\epsilon)$ (путем представления ее в виде кусочно-линейных функций) в диссертации решены задачи:

- а) распространение волн напряжения в средах с возрастающей сжимаемостью;
- б) прохождения непрерывной волны напряжения в упругих средах с прослойками;
- в) перехода волны напряжения из одной упруго-пластической среды в другую упруго-пластическую среду с большей сжимаемостью.

При этом показано, что при распространении волны в среде с возрастающей сжимаемостью происходит уменьшение параметров

не просто. При прохождении волны через прослойки с большей чем основной среды сжимаемостью происходит угасание волны и интенсивность его зависит от отношения акустических сопротивлений основной среды и прослойки, от временных параметров падающей волны.

3. Экспериментальные исследования количественных закономерностей распространения волн напряжения в горных породах позволили установить, что:

а) интенсивность затухания волн напряжения в горных породах меняется в широком диапазоне. В некоторых породах интенсивность затухания близка к идеально-упругой среде, показатель n близок к единице; в других - он близок к трем, что характерно для вязких грунтов. Потери энергии, а следовательно и затухание волн с расстоянием связано с наличием пластических и вязких свойств;

б) фактические значения параметров волн напряжений, измеренных в массиве с экранирующими прослойками оказались в 2-3 раза ниже соответствующих значений при взрывании в сплошном массиве. Более интенсивное снижение параметров в реальном массиве по сравнению со значениями их, полученных теоретическими расчетами, объясняется наличием вязких свойств среды. С увеличением интенсивности дробления породы в прослойке увеличивается интенсивность угасания параметров. Время нарастания максимального напряжения при наличии экранирующей прослойки увеличивается в 1,5-1,8 раза;

4. Разработана методика расчета параметров экранирования и определена область применения результатов исследований для решения ряда инженерных задач. Эта методика включает:

а) номограмму для расчета безопасных весов заряда на определенных расстояниях при заданных параметрах экранирующих прослоек;

б) аналитические и эмпирические зависимости для определения допустимой скорости смещения при условии деформирования массива в пределах упругости, для определения скорости смещения при взрывах в сплошном массиве и массиве с прослойками;

в) аналитические и экспериментальные зависимости для оценки влияния предыдущих взрывов на закономерности распространения волн в горных породах.

5. Рекомендации, приведенные в работе, нашли применение при конструировании системы разработок на Сумсарском руднике, в расчетах допустимых весов заряда при взрывах в массиве горных пород, расчлененного системой трещин в условиях строительства Токтогульского гидроузла, а также при оценке влияния нарушения массива действием предыдущих взрывов на параметры волн напряжений.

Задачей дальнейших исследований является расширение области применения приведенных в работе аналитических зависимостей и методики расчета параметров экранирующих прослоек в практике горнорудных предприятий и при строительстве гидротехнических сооружений.

Основные положения диссертации докладывались на Юбилейной научной конференции молодых ученых Киргизии в г. Фрунзе, 1968, конференции по разрушению горных пород в г. Караганде, 8-13 декабря 1968 г., УШ сессии научного совета по народно-хозяйственному использованию взрыва в г. Днепропетровске, 15-20 мая 1969 г.

Основные положения диссертационной работы
опубликованы в следующих статьях

1. Н.А.Штейнбах. Действие волн сжатия и разгрузки в упругих и упруго-пластических средах. Сб. "Разрушение горных пород взрывом", "Илим", 1969.

2. Г.М.Ляхов, Н.А.Штейнбах. Исследование распространения волн напряжения в неоднородных средах с изменяющейся сжимаемостью. Сб. "Управление процессами взрыва", "Илим", (в печати).

3. Н.А.Штейнбах. Механизм взаимодействия волн напряжения с прослойками в горных породах. Труды УШ сессии научного Совета по народнохозяйственному использованию взрыва, "Наукова думка", Киев, 1970.

4. Н.А.Штейнбах, Ю.Я.Савельев. Исследование экранирующего действия скважинных зарядов в условиях Сумсарского рудника. Сб. "Вопросы разработки полезных ископаемых". Изд-во "Кыргызстан", 1970.

Подписано в печать 28/IV-70 г. Объем 1,75 печ. л.
Формат бумаги 60x90/16. Зак. 823. Тир. 200. Д-06384

г. Фрунзе, тип. АН Кирг. ССР
ул. Пушкина, 144