Известия АН Арм. ССР, Науки о Земле, 1, 55—63, 1979

УДК 622.235

М. И. ПЕТРОСЯН

О СВЯЗИ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ С РАЗРУШЕНИЕМ ГОРНЫХ ПОРОД

Подземная разработка рудных месторождений неразрывно связана с применением взрывной отбойки, ее роль с расширением и совершенствованием технологии выемки постоянно увеличивается. Задачей взрыва теперь является не только отделение от массива полезного ископаемого и его дробление, но также и сохранение массива за контуром скважин от возможных разрушений вмещающих пород, разубоживающих руду. Решение этой проблемы возможно на основе глубокого изучения физической природы действия взрыва на горные породы. Как известно, в настоящее время отсутствует единое мнение специалистов по этому вопросу, представления о роли взрывной волны и продуктов детонации взрывчатого вещества (ВВ) противоречивы. Несмотря на это, анализ работ в области взрывной отбойки показывает общность во взглядах авторов, согласно которым массив разбивается трещинами, обусловленными действием взрывной волны, а продукты детонации, как бы завершая работу взрыва, только лишь расчленяют его. Обращает на себя внимание представление строго волновой схемы дробления пород в зоне, примыкающей к заряду [7]. Эксперименты, на которых основывается это представление, выполнены на оптически активных материалах (плексиглас, стекло и др.). Не затрагивая подробности методологических положений, отметим, что основным недочетом эксперимента является невозможность обеспечения необходимых и достаточных условий подобия между натурой и моделью. В связи с этим был развит метод эквивалентных материалов [1] и разработан способ регистрации трещин в процессе разрушения пород взрывом [6], что позволило расширить возможности изучения кинетики разрушения тела.

Для изучения физической природы действия взрыва на горные породы, необходимо было установить долевое участие взрывной волны и продуктов детонации ВВ.

Регистрацию напряжений, возникающих в массиве при прохождении взрывной волны осуществляли с помощью тензодатчиков специальной конструкции. В блоке модели (рис. 1) устанавливали три тензодатчика на различных уровнях уступа, располагая их (в глубь массива) на расстоянии 38 *мм* от заряда *(тэн)*. Скважину диаметром 2,4 *мм* и длиной 370 *мм* располагали параллельно поверхности обнажения, принимая линию наименьшего сопротивления *(лнс)* 35 *мм*. На рис. 2 показаны осциллограммы напряжений, развивающихся во времени в трех конкретных точках массива. При этом фиксируется смещение импульса взрыв-

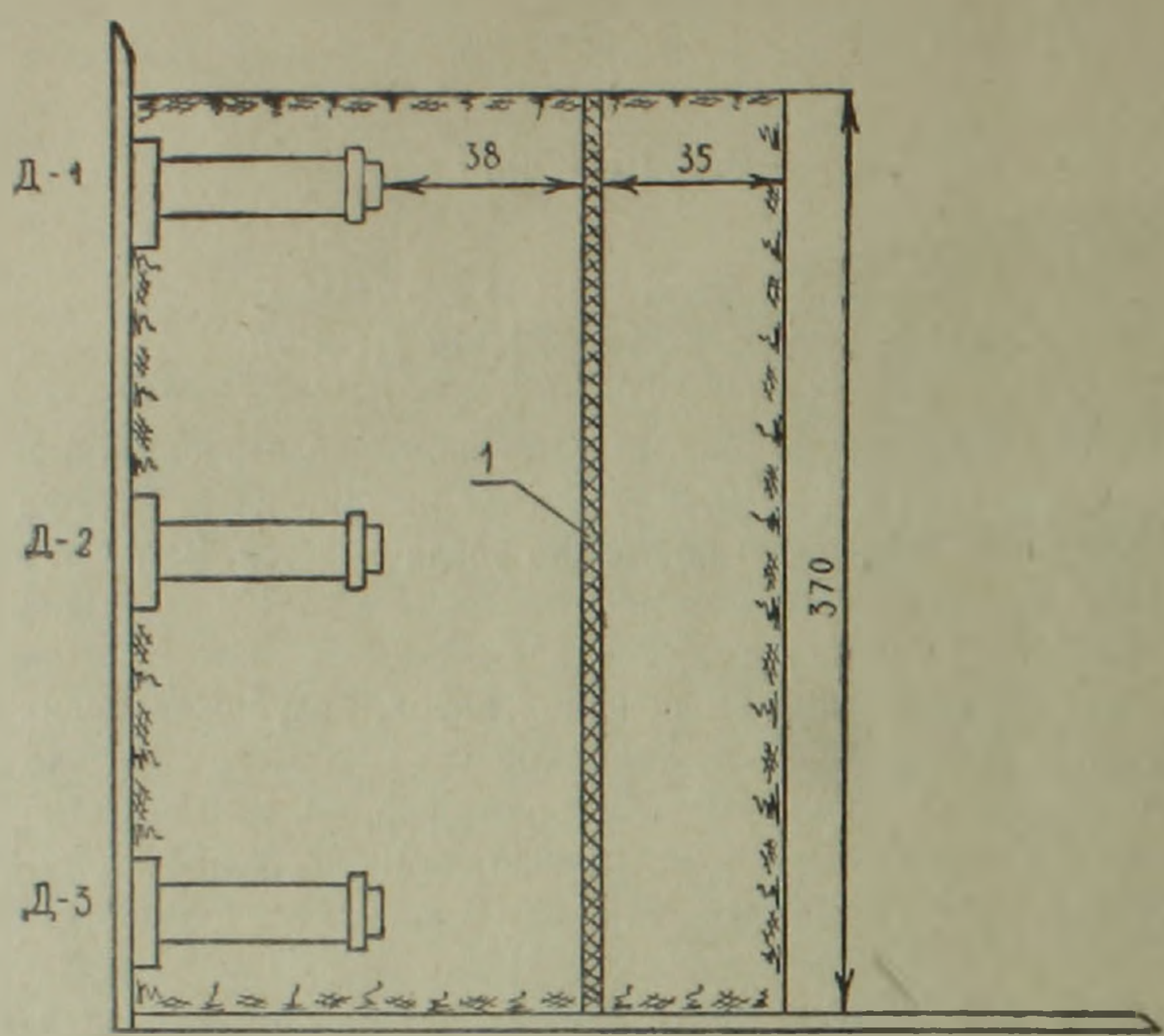

Рис. 1. Схема расположения скважинного заряда (1) и датчиков в блоке модели.

ной волны, обусловленное детонацией удлиненного заряда. В верхней части уступа, где установлен датчик Д-1, вход волны на осциллограмме наблюдается через 30 *мкс* с момента детонации заряда, в средней части, где установлен датчик Д-2. через 60 *мкс* и в нижней части, где установлен датчик Д-3, через 130 *мкс*. Периоды импульса взрывной волны в верхней, средней и нижней точках уступа соответственно равны 175, 300 и 125 *мкс*. Время действия взрывной волны экспоненциально связано с максимальными напряжениями и в трех точках массива составляет 75, 100 и 50 *мкс* (рост напряжений), 100, 200 и 75 *мкс* (спад напряжений). Максимальные напряжения в верхней, средней и нижней точках уступа соответственно равны 196, 98 и 49 *кгс/см*^{2}.

Кинетику разрушения изучали на эквивалентных материалах, твердеющей закладке и горных породах взрывом одиночных зарядов в блоках размером ребра 200÷500 *мм*. Эта упрощенная схема взрывания исключает возможности влияния различных факторов на разрушаемую среду, которые возникают при взрыве групповых зарядов. В процессе выполнения опытов фиксировали вес ВВ *(тэн)*, диаметр и длину заряда, *мс*. Регистрацию возникновения, роста и ветвления трещины осуществляли с помощью установки типа ЛВ-04 (лупа времени), которая оборудована электронно-оптическим преобразователем УМИ-92 или УМИ-93. Прежде всего необходимо было изучить параметры разрушения блоков из эквивалентного материала для сравнения с результатами регистрации развития напряжений в этой среде. Нами получены кадры ско-

ростной регистрации процесса разрушения блока эквивалентного материала при взрыве заряда весом 80 *мг*, диаметром 1,8 *мм* и длиной 35 *мм* Поверхность исследуемого объекта расположена на расстоянии 30 *мм* от места взрыва. Здесь необходимо учитывать положение о том, что период импульса взрывной волны заряда с меньшим диаметром и длиной всегда меньше периода импульса, зарегистрированного на одном и том же относительном расстоянии при взрыве заряда с большим диаметром и длиной. Принимая допущение в пользу взрывной волны, устанавливаем, что долговечность эквивалентного материала больше периода существования взрывной волны, возникновение трещины на поверхности блока зарегистрировано на пятом кадре. Учитывая время экспозиции кадра 20 *мкс* и интервал времени между кадрами 100 *мкс*, устанавливаем задержку разрушения, которая равна 480 *мкс*. Скорость взрывной волны в пределах зоны активного разрушения равна 1150—1200 *м/сек*. При этом головная часть взрывной волны продвинется на расстояние 216 *мм*, которая значительно (до 15 раз) опережает фронт разрушения слоя.

Согласно представлениям С. Н. Журкова и др. [3] долговечность тела определяется кинетикой накопления и укрупнения зародышевых трещин. Это представление при статическом нагружении твердого тела не

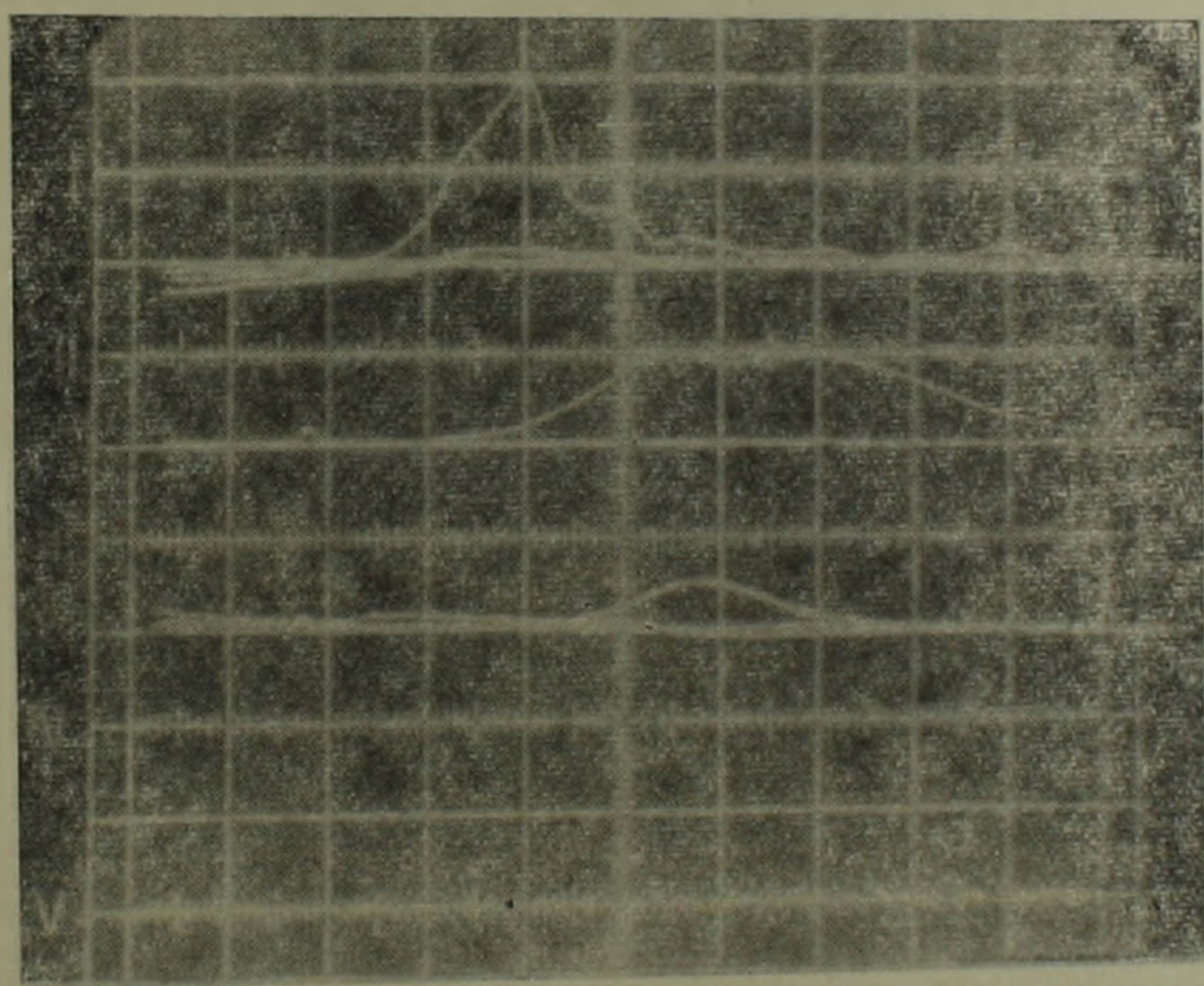

Рис. 2. Осциллограммы напряжений, зафиксированных в блоке модели при взрыве скважинного заряда диаметром 2,4 *мм*.

оспаривалось. Задержку разрушения при динамическом нагружении изучали В. М. Финкель и др. [8]. Показано, что существует задержка разрушения—временной интервал, отделяющий начало роста трещины от момента удара, Утверждается, что это явление в металле связано с пла-

стической деформацией. Однако задержка разрушения была установлена также на стекле, лишенном пластических свойств. В стекле, имеющем исходную трещину или надрез, задержка разрушения отсутствует или проявляется в малой степени. В связи с этим В. М. Финкель, отмечает: «По-видимому, задержка разрушения обусловлена необходимостью образования зародышевой трещины». Существует ли задержка при взрывном разрушении горных пород, содержащих многочисленные зародышевые трещины. И если да, какова физичеокая природа этого процесса?

На рис. 3 показаны кадры скоростной регистрации процесса разрушения блока из базальта, представленного неплотной структурой. Поверхность исследуемого объекта расположена от места взрыва на расстоянии 12 радиусов заряда. В табл. 1 представлены данные о времени «жизни» образцов горных пород при взрывной нагрузке, которая составляет 240—630 *мкс*.

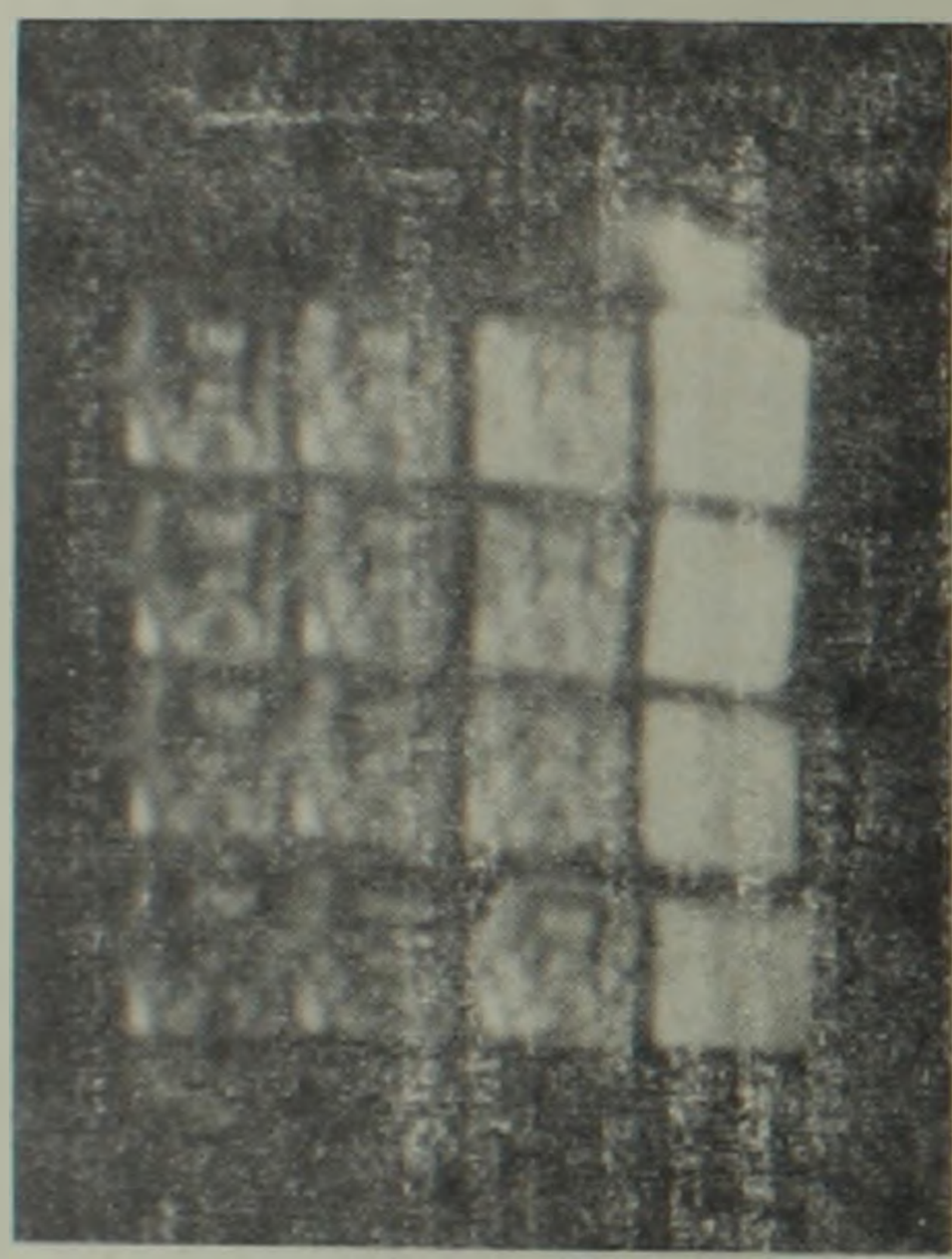

Рис. 3. Кадры скоростной регистрации процесса разрушения базальта. Время экспозиции кадра 20 *мкс*, интервал времени между кадрами 100 *мкс*.

Взрыв в горных породах в принципе включает две стадии: первую стадию детонации заряда и вторую—расширения продуктов детонации. При детонации ВВ взрывная волна распространяется в окружающую среду, в результате чего происходит смещение частиц и возникают напряжения. Первая стадия взрыва определяется малой долговечностью (менее 10^{-3} *сек*) и действует на массив апериодически в виде импульса-взрывной волны с четко выраженным пиковым значением. В зависимости от характера проявления взрывной волны принято называть ее ударной волной или волной напряжений. Ударная волна фиксируется на относительном расстоянии до 12 радиусов заряда. С увеличением расстояния от места взрыва происходит спад напряжений и увеличение периода импульса волны. Энергия взрывной волны в пределах зоны активного раз-

Таблица 1

Задержка разрушения при взрыве

Материал	Вес ВВ *мг*	Расстояние поверхности обнажения от заряда, *мм*	Задержка разрушения, *мкс*
Эквивалентный материал	80	30	480
Твердеющая закладка	50	35	630
Каменная соль	71	24	540
Базальт	180	12	260
Мрамор	222	28	320
Туф	169	24	240

рушения составляет 2—5% от общей энергии заряда. При отражении взрывной волны от поверхности обнажения горного массива, ввиду резкого изменения поля упругих напряжений происходит откол. Можно привести много примеров из практики работы рудников, когда с увеличением веса взрываемого ВВ фиксируется рост отколов, приводящих к подработке стенок очистных камер и междукамерных целиков. В определенных условиях, когда правильно принимается интервал замедления короткозамедленного взрывания при отбойке руды сохраняется поверхность обнажений горного массива. Разубоживание руды при этом минимальное. Таким образом, роль взрывной волны при дроблении руды незначительна, она производит разрушения горных конструкций, обусловленное растягивающими напряжениями и сейсмическим воздействием.

По-видимому, разрушение горных пород при их отбойке связано со второй стадией взрыва, т. е. с расширением продуктов детонации ВВ, которые подобно своеобразному «поршню» давят на стенки зарядной полости. В результате подвижки слоя по *лнс* осуществляются, в основном, акты распада горной породы на части. Вторая стадия взрыва относится к области больших долговечностей (10^{-3} *сек* и более). Однако разрушение горной породы взрывом определяется не одной или двумя трещинами, а системой ветвленных трещин, поэтому период полного раз-

Таблица 2

Результаты регистрации периода импульса волны и периода разрушения горных пород

Материал	Период импульса взрывной волны, *мкс*	Период полного разрушения слоя, *мкс*
Эквивалентный материал	48	1540
Твердеющая закладка	56	1850
Туф		580
Базальт		1260
Каменная соль		2060

рушения (дробления) слоя больше его долговечности— времени существования тела под нагрузкой. Из табл. 2 видно, что величина периода полного разрушения слоя примерно на два порядка больше периода существования взрывной волны. Очевидно, что разрушение слоя не совпадает с временем действия взрывной волны. Остается неясным вопрос накопления зародышевых трещин, предшествующего макроразрушению, при взрыве в горных породах. Экспериментально установленные период действия взрывной волны и долговечность слоя дают основание считать, что концентрация макротрещин мало связано с присутствием взрывной волны.

Роль продуктов детонации заряда при разрушении породы существенна, оказывая поршневое действие на горные породы, они определяют силовой фактор разрушения. Теплота взрыва играет не основную роль, ее влияние с удалением от места взрыва слабее. Однако на контакте с зарядом и в ближней зоне, примыкающей к заряду (расстояние до 12 радиусов заряда), по-видимому, действие теплового фактора разрушения значительно, и его необходимо учитывать. Это представление подтверждается практикой взрывной отбойки. При концентрации ВВ, т. е. с увеличением диаметра зарядов при разреженной сетке их расположения получается неравномерное дробление с выходом большого количества рудной мелочи, вблизи заряда, и негабарита с удалением от него.

Согласно исследованиям [4] прочностные и деформационные характеристики горных пород являются функциями времени (скорости) нагружения. Увеличение времени нагружения ведет к понижению сопротивляемости материала деформированию и разрушению. Такой подход к проблеме разрушения показывает, что основным направлением повышения полезного использования взрыва является увеличение времени поршневого действия продуктов детонации ВВ на горный массив. Основными способами достижения этой цели являются: применение ВВ с умеренной скоростью детонации, выделяющих сравнительно большее количество газообразных продуктов; короткозамедленный способ взрывания; применение конструкции заряда с воздушными промежутками и др.

Покажем плодотворность применения зарядов с воздушными промежутками. Произведены взрывы в двух аналогичных блоках плотного туфа ереванского типа с применением зарядов различных конструкций (рис. 4, 5). При этом величина всех одноименных параметров постоянна. Глубина скважины—80 *мм*, диаметр—2 *мм*, вес *тэна*—124 *мг*, *лнс* равна 25 *мм*. В скважине первого блока длина заряда 40 *мм*. Во второй скважине заряд разделен воздушным промежутком 10 *мм* на две части, длина нижней части 28 *мм* и верхней—12 *мм*. Регистрация разрушения уступа произведена с помощью ЛВ-04 при времени экспозиции кадра 20 *мкс* и интервале времени между кадрами 100 *мкс*. На рис. 4 кадры развития трещин при взрыве сплошного цилиндрического заряда, а на рис. 5 показана аналогичная картина при взрыве цилиндрического заряда, рассредоточенного воздушным промежутком. Заметим,

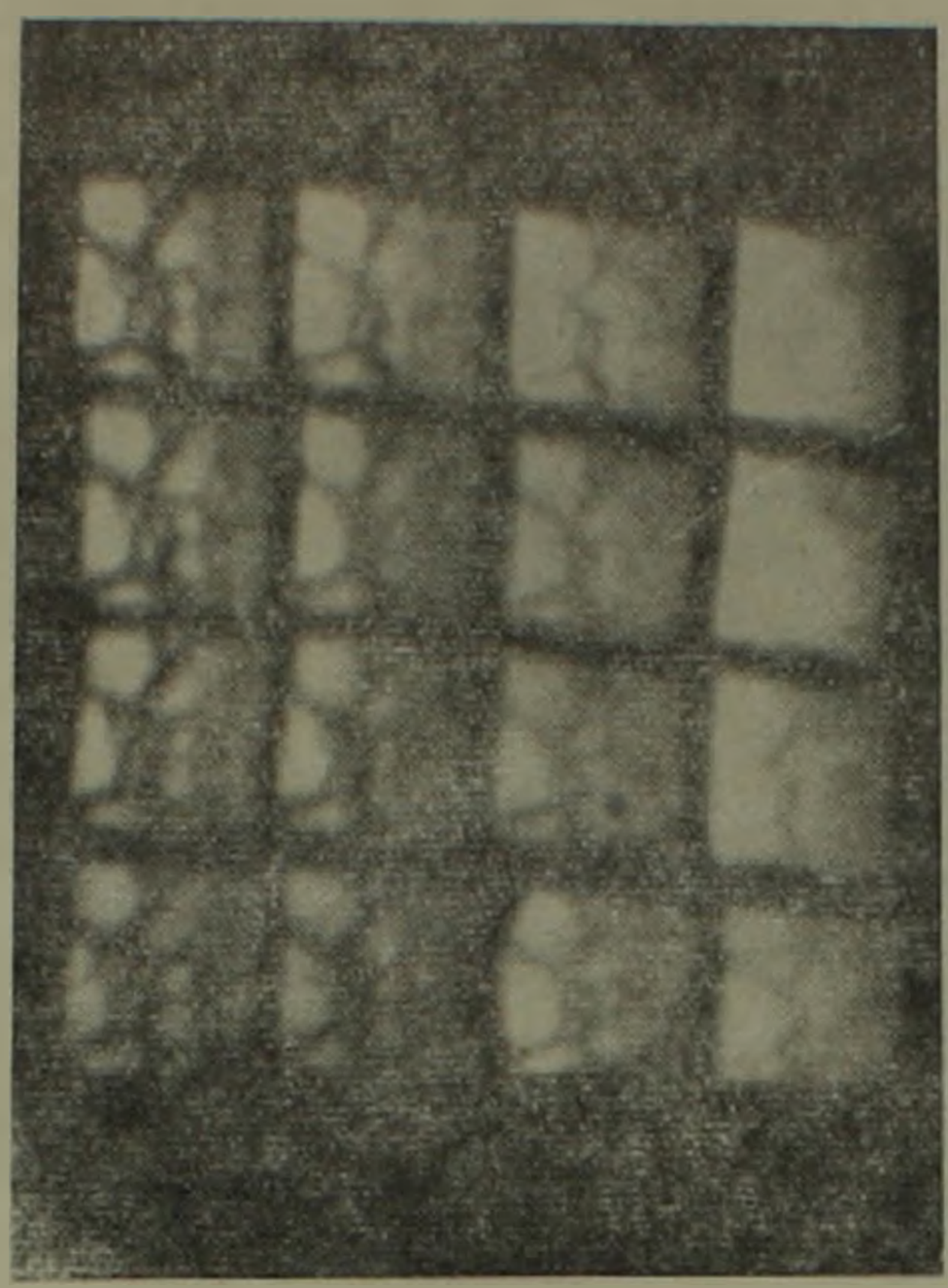

Рис. 4.

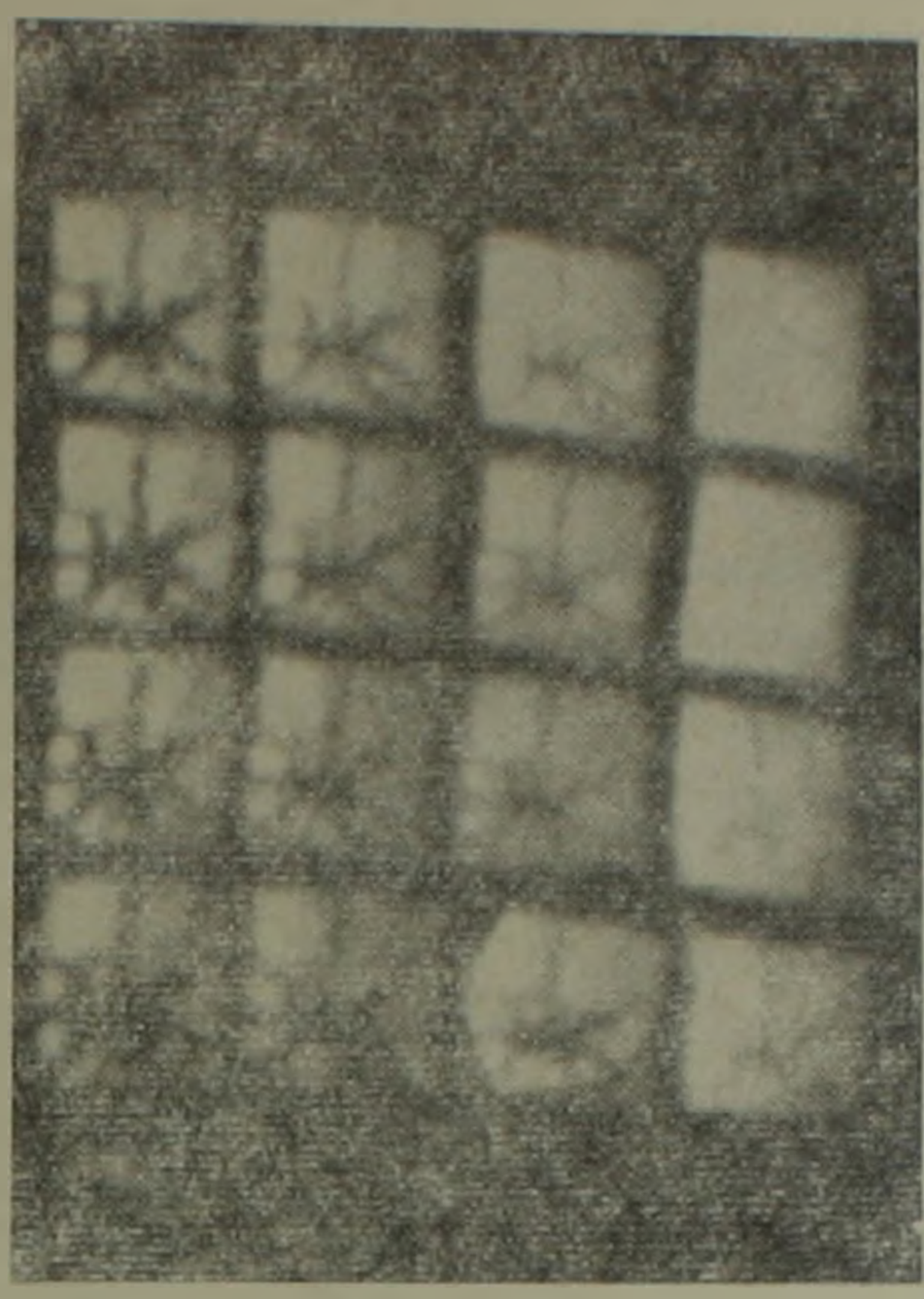

Рис. 5.

Рис. 4. Кадры скоростной регистрации процесса разрушения туфа при взрыве сплошного скважинного заряда. Время экспозиции кадра 20 *мкс*, интервал времени между кадрами 100 *мкс*.

Рис. 5. Кадры скоростной регистрации процесса разрушения туфа при взрыве скважинного заряда, рассредоточенного воздушным промежутком. Время экспозиции кадра 20 *мкс*, интервал времени между кадрами 100 *мкс*.

что начало возникновения трещин зарегистрировано на третьем кадре, т. е. через 260 *мкс* после взрыва. Скорость роста трещины в обоих случаях равна 96 *м/сек*. На последующих кадрах наблюдается различие в развитии разрушения. При взрыве сплошного цилиндрического заряда возникает магистральная трещина, расположенная напротив колонки заряда. В местах ветвлений обнаруживается отклонение этой трещины. При взрыве цилиндрического заряда, рассредоточенного воздушным промежутком, возникает также одна магистральная трещина, однако в нижней части поверхности обнажения трещины возникают «розой», которые покрывают 2/3 поверхности слоя. Таким образом, при заряде с воздушным промежутком степень дробления примерно в 1,5 раза больше по сравнению с зарядом сплошной конструкции. Результаты экспериментов данной серии являются прямым подтверждением представлений относительно применения зарядов с воздушными промежутками [5].

Известен также способ повышения эффективности действия взрыва за счет увеличения объемной концентрации энергии ВВ [2]. Этот способ послужил основой для внедрения дешевых ВВ простейших составов с большим экономическим эффектом. При анализе сопоставительных взрывов [2] с использованием игданитов и детонитов обращает на себя внимание относительно высокая степень дробления при игданите. Замечаем, что при замене детонита игданитом, выделяющих соответственно

835 и 750 *л/кг* газообразных продуктов, вес заряда нужно увеличить всего лишь на 10%, чтобы сохранить объемную концентрацию газообразных продуктов детонации заряда. Фактически плотность игданита, при пневматическом заряжении скважин или шпуров несколько выше (1,00—1,25), поэтому больше удельный расход газов и выше степень дробления. Концентрация газов имеет принципиально важное значение в том смысле, что увеличивается время поршневого действия взрыва, обеспечивающее сравнительно высокую диссипацию тепловой энергии, разрыв и подвижку породы по *лнс*. При взрыве продукты детонации действуют равномерно на окружающий массив, несмотря на это перемещение горной массы происходит по *лнс*, в направлении компенсационного пространства. Таким образом, роль энергии продуктов детонации ВВ при отбойке руды и горных пород существенна,, обеспечивает дробление и перемещение горной массы. По-видимому, удельный объем продуктов детонации, как основной критерий работы взрыва, является наиболее приемлемым при оценке методов взрывной отбойки.

Установленные закономерности разрушения, параметры взрывной волны и продуктов детонации ВВ способствуют развитию теории разрушения горных пород взрывом. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего совершенствования процесса управления действием взрыва, а также при изучении механизма разрушения, связанного с вулканическими процессами.

Армнипроцветмет

Поступила 27.IX.1978

Մ. Ի. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՊԱՅԹՄԱՆ ԱԼԻՔԻ ԿԱՊԸ ԼԵՌՆԱՅԻՆ ԱՊԱՐՆԵՐԻ ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ՀԵՏ

Ամփոփում

Հանքանյութի հարվածահատման ժամանակ անհրաժեշտություն է ծագել պարզելու պայթման ալիքի և պայթուցիկ նյութերի դետոնացման արդյունքների բաժնեմասային մասնակցությունն այդ պրոցեսում։ Լեռնային ապարի զանգվածում առաջացող լարվածությունների արձանագրման եղանակների կիրառմամբ և քայքայման կինետիկայի ուրագրնթաց լուսանկարահանման շնորհիվ տվյալներ են ստացված պայթման ալիքի պարամետրերի մասին, պարզված է մարմնի դիմացկունությունը։ Ցույց է տրված, որ լեռնային ապարների քայքայման ժամանակամիջոցը մի մեծություն է, որն երկու կարգով գերազանցում է պայթման ալիքի ազդեցության ժամանակը։ Շերտի բեկորատման հիմնական գործոններ են հանդիսանում պայթուցիկ նյութի դետոնացման արդյունքները։ Ուսումնասիրությունը նպաստում է քայքայման ազդեցության ընթացքի ղեկավարումը զարգացնելուն։ Բացահայտված է քայքային էֆեկտը օդային միջակայքով լիցքերի պայթման ժամանակ։ Աշխատության արդյունքները կարող են կիրառվել քայքայման կինետիկայի ուսում-

նասիրման ասպարեզում, մասնավորապես, հրաբխային երևույթների հետ կապված քայքայումները հետազոտելիս։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бронников Д. М., Замесов Н. Ф., Петросян М. И.* Моделирование взрывной отбойки с фиксацией напряжений в любой точке модели. Сб. «Проблемы разрушения горных пород и совершенствования технологии разработки месторождений полезных ископаемых». М., «Наука», 1969.
2. *Демидюк Г. П.* О потенциальной энергии как критерии оценки промышленных взрывчатых веществ. Сб. «Взрывное дело, 57/14». М., 1965.
3. *Журков С. Н., Куксенко В. С.* и др. О прогнозировании разрушения горных пород. Известия АН СССР, Физика Земли, 6, 1977.
4. *Кунтыш М. Ф., Тедер Р. И.* Влияние скорости разрушения на предел прочности пород при сжатии. Сб. «Исследование физико-механических свойств и взрывного способа разрушения горных пород». М., «Недра», 1970.
5. *Мельников Н. В., Марченко Л. И.* Энергия взрыва и конструкция заряда. М., «Недра», 1964.
6. *Петросян М. И., Гаспарян Т. Г.* Об одной методике моделирования разрушающего действия взрыва на горные породы. Научные сообщения Армнипроцветмета, выпуск 22—24. Ереван, «Айастан», 1978.
7. *Покровский Г. И., Федоров И. С.* Действие удара и взрыва в деформируемых средах. М., Госстройиздат, 1957.
8. *Финкель В. М.* Физика разрушения. М., «Металлургия», 1970.