A.H.POMAIIIOB

ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ КРУПНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ



622.235 40440 <u>Р-69</u> Ранашов АН Особенности дейны-вия прупных подзен-ного взернов

Книга должна быть возвращена не позже указанного здесь срока

Колячество предыдущих выдач. 11/213 -1971

20052.

622.235 P-69

А. Н. РОМАШОВ

ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ КРУПНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ



ТЕХНИЧЕСКАЛ БИБЛИОТЕНА 6.1 Elubo BHB. JULOYYE

Москва Недра 1980

YIX 622,235.67(24)

Реманта А.Н. Особенности действия крупных подземных восьзов. М., Недра, 1980. с.

В кныге изложены основы физических представлений о сействии подземного взрыва. Приведены результаты действия каму-летного взрыва в различных средах, дан анализ просессов передачи энергии от продуктов взрыва в среду, проаизлизированы параметры волны сжатия и закономерности ее распространения. Изложены основы инженерных методов расчета взрывов на выброс, а также особенности использования крупных, в том числе ядерных взрывов. Изложены вопросы излучения сейсмических воли и принципы прогнозирования сейсмической безопасности.

Кныга предназначена для работников научно-исследовательских и проектных институтов, занимающихся использованием взрывной энергии в различных отраслях народного хозяйства.

Табл. 32, ил. 113, список лит. - 79 назв.

Редевзент проф., д-р техн. наук В.Н. Мосянед

P 30705 - 407 043(01)-80 352-80, 2502000000

Ф Излательство Недра, 1980

ВВЕДЕНИЕ

Понятие в подземный взрыв трактуется по-разному. В данной работе подземным вэрывом считается такой взрыв, при котором центр заряда взрывчатого вещества (ВВ) располагается на глубине, превышающей радиус заряда. Другими сповами, взрыв считается <u>под-</u> <u>земным</u>, если заряд полностью располагается ниже поверхности земли. Соответственно, если заряд выступает над поверхностью земли, то взрыв следует считать <u>контактным</u>.

Подземные взрывы, в свою очередь, различаются в зависимости от того, какое видимое действие на поверхности земли они производят. Так, взрывы, сопровождающиеся выбросом породы и образованием видимой выемки, называются взрывами на выброс. Если эти взрывы производятся вблизи наклонной свободной поверхности и выбрасывание породы происходит примущественно в одну сторону, то они называются взрывами на сброс, или направленными взрывами. Когда действие вэрывов проявляется в виде дробления (рыхления) породы без значительного ее перемещения в пространстве, то они называются взрывами рыхления. И, наконец, подземный взрыв, при котором не наблюдается никаких видимых нарушений поверхности земли, а все его действие (дробление, образование котловой полости и т.п.) проявляется скрыто внутри массива породы, называется обычно <u>ка-</u> муфлетным взрывом,

Все перечисленные виды подземного взрыва находят широкое практическое применение. Ряд областей использования подземного взрыва, такие как дробление пород на карьерах, сейсмическая разведка, строительство небольших каналов, водоемов и другие, в настоящее время стали традиционными. Задачи, которые возникают при использовании подземного взрыва, в основном сводятся к отработке технологических схем взрывания без серьезного исследования самого явления взрыва. Как правило, во всех этих случаях уже накоплен значительный опыт использования подземного взрыва, обеспечивающий довольно надежное прогнозирование результатов его действия.

Наряду с традиционными вариантами использования подземных вэрывов в настоящее время наметились относительно новые области использования энергии взрыва. В основном – это область гидромелиоративного строительства. Новизна использования подземных вэрывов здесь состоит в том, что за последнее время резко увеличились размеры возводимых с помощью взрыва объектов и соответственно масса одновременно взрываемых зарядов. Так, например, общая масса зарядов ВВ, которые были взорваны при строительстве селезацитной илотины на р. Малой Алмаатинке, составила около 10 тыс. т. Проект строительства Камбаратинского гидроузна, который прорабатывается в настоящее время, предусматривается использование зарядов ВВ общей массой 300 - 400 тыс. т. Только для моделирования

1-2

З

ртого гигантского взрыва в 1976 г. был проведен опытный взрыв зарядов массой около 800 т на р. Бурлыкия [19].

Наряду со строительством крупных завальных плотин в гидромелиоративном строительстве в настоящее время поставлена проблема создания каналов, позволяющих осуществлять широкое перераспределение водных ресурсов страны, включая переброску части стока северных рек в баосейн Волги и в районы Средней Азии. Лишь при создании первой очереди этих каналов планируется осуществить с помощью взрывов екскавалионные работы объемом около 800 млн. м³. При етом потребуется более 3 млн. т ВВ, причем на отдельных участках канала масса заряда на 1 м канала должна достигать 20 т. В кастоящее время есть лишь единичные случаи взрывов, которые по своим масштабам приблюкаются к планируемым взрывам.

Необходимость осуществления крупных проектов гидромелиоративного строительства поставила ряд принципиально новых задач, решение которых на базе имеющегося опыта использования подземного взрыва оказалось невозможным. Потребуются еще дополнительные теоретические и експериментальные исследования для того, чтобы решить ети задачи.

Книга посвящена в основном вопросам, связанным с указанными выше задачами в гидромелноративном строительстве. Главное внимание в ней обращено на такие типы подземного взрыва, как взрыв на выброс и взрыв на сброс. При использовании крупных зарядов обнаружилась несостоятельность существующих методов расчета, разработанных применительно к взрывам относительно малого масштаба. Так, например, совершенно иными оказались законы подобия, с помощью которых можно осуществлять пересчет от малых масштабов взрыва к большим масштабам. По-новому также приходится решать и вопросы сейсмической безопасности крупных взрывов. Если при малых взрывах сейсмическое воздействие оценивалось интегрально по некоторой максимальной амплитуде колебаний, то с переходом к крупным вэрывам потребовалось расчленить весь цуг колебаний на отдельные волны и оценивать сейсмическое воздействие по каждой конкретной волне, суммируя затем эти воздействия.

Основное внимание в книге обращено на выяснение физико-механических явлений, сопровождающих подземный вэрыв. Такой акцент в настоящее время представляется оправданным потому, что фактический матернал по действию крупных подземных взрывов еще сравнительно невелих. Он недостаточен для того, чтобы на нем постронть надежные эмпирические расчетвые формулы. Чтобы полнее использовать вмеющиеся фактические данные по крупным взрывам при проектировании строительства ковых гидромелиоративных объектов необхоимо глубже понять само явление вэрыва. Практика исследований показала, что такое понимание наилучшим образом достигается при соелинении результатов крупных взрывов с данными соответствующих модельных исследований.

1. ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА НА ВЫБРОС

1.1. Попходы к решению вопросов

Важным результатом длительного практического использования подземных вэрывов в различных областях народного хозяйства явилось установление геометрического принципа подобия между зарядами и воронками выброса разного масштаба. Построенная на етом принципе формула Борескова [14] до сих пор является основой для расчета большинства промышленных взрывов:

 $Q = K h_3^3 (0.4 + 0.6 n^3).$

Согласно этой формуле, масса заряда Q пропорциональна глубине заложения заряда h_3 в третъей степени и функции показателя выброса, в которой n – отношение радиуса видимой воронки $R_{,B}$ к глубине заложения заряда h_3 . Коэффициент пропорциональности K характеризует удельный расход ВВ и определяется опытным путем как отношение массы заряда к объему взорванной породы. Для развых пород и груктов коэффициент K различен [14].

Отклонение от геометрического подобия начали замечать при проведении крупных взрывов, которые стали применять с 30-х годов. Так, в 1936 г. на Коркинском месторождении пласты бурого утля были вскрыты с помощью взрыва зарядов общей массой 1800 т[14]. При освоении Алтын-Топканского месторождения было проведено три серии крупных взрывов, в которых наибольший заряд имел массу 1640 т. Причина отклонения результатов крупных взрывов от расчетных величий, определенных на основе геометрического подобия, виделась в том, что с переходом к большим масштабам втот принцип подобия перестает выполняться из-за возрастания ропи силы тяжести. Впервые количественная поправка к формуле Борескова, учитывающая влияние силы тяжести, была предложена Г.И.Покровским и М.А. Садовским в виде коеффициента, зависящего от глубины заложения заряда [14, 35]. В таком исправленном виде формула (1) применяется до настоящего времени.

Наиболее систематическое исследование масштабного эффекта при вэрывах на выброс было проведено в 1957 г., когда была организована специальная экспедиция для проведения экспериментального 1000-тонного вэрыва [15]. Как в период подготовки этого вэрыва, так и после, когда производилась обработка его результатов, было проведено большее число опытных вэрьвов более мелкого масштаба с зарядами массой от 10 кг до 10 т [15, 72], которые в совокупности с лабораторными исследованиями позволили создать качественную теорию вэрыва на выброс. Было, в частности, установлено, что

(1)

взрыв на выброс развивается в две стадии. Первоначальное движение породы создается волной скатия.

На первой стадии формируется котповая полость, размеры которой близки к размерам аналогичной полости при камуфлетных вэрывах. Далее начинается вторая стадия: продукты вэрыва в котповой полости расширяются преимущественно в сторону свободной поверхности, обеспечивая дополнительное ускорение выбрасываемой породы. Вторую стадию развития взрыва принято называть <u>стадией газового ус-</u> корения.

Особую остроту вопрос о подобии взрывов крупного масштаба приобрел в связи с появившейся в 50-х годах возможностью использования в мирных целях внергии ядерных взрывов. Это активизировапо исследование вопроса как в нашей стране, так и за рубежом. Американские специалисты в течение 1951 - 1960 гг. провели большую серию опытных химических взрывов. Максимальная масса заряда в этих опытах достигала 454 т [35]. Одной из основных задач, которая решалась при проведении химических и первых ядерных взрывов, являлось как раз установление "закона приведения" ("масштаба приведения"). В нашей питературе более распространенными являются термины" закон подобия" или "показатель подобия". В общем виде этот закок записывается спедующим образом;

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{\varrho_1}{\varrho_2}\right)^m,\tag{2}$$

где L - пинейные размеры, характеризующие вэрыв (глубина заложения заряда, радиус или глубина воронки и т.п.).

Такая форма записи наиболее соответствует экспериментальным данным, однако в работе [6] справедливость степенного закона подобия применительно к вэрывам на выброс была доказана строго.

На основании результатов химических и первых ядерных взрывов большинство американских специалистов пришло к выводу, что при m = 1/3,4 (в отличие от m=1/3 при геометрическом подобии) можно построить единые графические зависимости типа

$$\frac{t_{\rm B}}{Q^m} = t_1 \left(\frac{h_3}{Q^m}\right); \frac{h_{\rm B}}{Q^m} = t_2 \left(\frac{h_3}{Q^m}\right); \frac{V_{\rm B}}{Q^{3m}} = t_3 \left(\frac{h_3}{Q^m}\right), \tag{3}$$

где г_в, h_в н V_в - соответственно раднус, глубина и объем видимой воронки выброса.

Нетрудно заметить, что попытки установления прямой связи тротиловых и ядерных взрывов с помощью некоторого единого показателя подобия представляют сугубо эмпирический подход. При этом различие в свойствах пород рекомендуется учитывать с помощью эмпирических коэффициентов подобно тому, как это делается в формуле Борескова. Такой подход представляется малоэффективным, так как надежное определение эмпирических ковффициентов требует проведе-

ния большого числа опытов с ядерными зарядами в самых различных условиях, что явно нереально. Недостатки указанного эмпирического метода были довольно скоро поняты, в результате чего сейчас сформировалось два главных направления исследований. Первое направление характерно для американских работ, в которых основное внимание сосредоточено на проведении прямых численных расчетов на ЭВМ конкретных взрывов с предварительным определением характеристик пород в районе будущего вэрыва [20, 35]. В результате проведенных расчетов американцы пришли к выводу, что свойства пород, в которых производятся взрывы, с точки эрения влияния на эффект выброса, можно расположить по важности в следующем порядке: содержание в среде воды, прочность породы на сдвиг, пористость, сжимаемость. Установлены также характерные стадии развития вэрыва, аналогичные описанным выше двум стадиям при развитии химических вэрывов на выброс.

Наиболее слабым местом в теоретических расчетах является, очевидно, трудность учета свойств горных пород в массиве, которые определяют как размеры, так и форму будущей воронки выброса. Непосредственно из расчетов получается профиль воронки, который далек от реального профиля, и переход от первого ко второму связан с целым рядом трудно контролируемых допущений. И не случайно, что расчетные параметры действия взрывов не всегда совпадают с фактическими. Поэтому американские специалисты в наиболее ответственных случаях наряду с расчетами продолжают пользоваться данными ранее проведенных взрывов, пересчитанными по соответствующим показателям подобия. В основном они пользуются показателем 1/3,4, хотя для взрывов мегатонного класса считают необходимым уменьшать ету величину до 1/4.

Вэрыв на выброс с учетом различий в свойствах пород, источниках энергии и других параметров представляет настолько сложное явление, что его трудно охватить с помощью прямых расчетов без предварительного физического исследования отдельных его стадий, которое, котати, может проводиться и на моделях. Разработка обоснованных физических представлений, на наш вэгляд, дает возможность полнее использовать имеющийся фактический материал по крупвым вэрывам. Этот путь характерен для исследований, проводимых в СССР.

Большая серия экспериментов была описана в работах [10, 11]. В качестве источника вэрывной энергии использовались химическое ВВ к энергия электрического разряда. Опыты проводились в лабораторных условиях. Они показали, что при подземном вэрыве энергия не является единственной характеристикой источника. Например, при равных энечених энергий в одинаковых условиях вэрывания электровэрыв оказался менее эффективным, чем химический вэрыв. Эффект действия электровэрыва возрастает, если в очаг добавлять инертные вещества, способные при разогревания давать газообразные компоненты. Все эти работы позволили обратить более пристальное внимание на такую характеристику пород, как их газовость при термическом разложении, что, кстати, совпадает с выводом американских специалистов с роли влажности среды. Важным направлением, разрабатываемым советскими специалистами взрывного дела, является исследование законов подобия [1, 15, 23, 35, 53, 67]. Было, в частности, обращено внимание на то, что изменение масштаба взрыва по-новому ставит вопрос о влиянии свойств среды [53]. Переход к более крупным взрывам означает и более глубокое запожение зарядов, гне среда, как правило, бывает более плотной и прочной, а ето значат, что при сопоставлении реальных вэрывов разного масштаба это изменение свойств среды необходимо учитывать. Оценка, данная в работе [53], показала, что сила тяжести является не единственной причиной отклонения от геометрического подобия. Изменение свойств среды с глубиной может в отдельных случаях давать эффект, соизмеримый с наблюдаемым измененкем показателя подобия.

Попытки прямого расчета параметров воронки выброса и установпения закона подобия предприняты в работе [23]. Программа счета в ней упрощена по сравнению с американскими расчетами, что позволипо провести более широкое исследование. Авторам удалось получить физически замкнутую модель взрыва на выброс и провести по ней расчет наиболее простого случая – расищение газового пузыря вблизи свободной поверхности. Сравнение с данными эксперимента [1, 67] дало удовлетворительное согласие. Учитывая, однако, эначительную упрошенность модели среды и самого явления взрыва, трудно с помощью этой программы надежно определить размеры воронок при реальных взрывах. Ее положительное экачение главным образом в том, что она позволила качественно оценить роль ценого ряда факторов: влияния начальной геометрии поверхности, атмосферного давления, угла треняя в среде и др.

Большую помощь при разработке теоретических и практических вопросов действия подземного вэрыва оказывают методы физического моделирования, которое в настоящее время развивается по двум соновным направлениям. Первое направление традиционно в состоит в попытках моделерования всего явления в целом, но в другом (меньшем) масштабе с последующим переносом полученных резупьтатов прямо на натуру. Такоя подход полностью себя оправдал при изучении взрывов в воздухе и в воде. К числу модельных исследования первого направления относится описанный выше способ определения показателя подобня для ядерных вэрывов по результатам хамических взрывов. По существу попытки полного моделирования предпринимались в исследованиях на экспериментальных ускоряющих установках [9, 43]. Опыт показал, что попытки полного моделярования взрыва на выброс не дали значительных результатов. Причина этого, очевидно, в том, что из-за спожности явления взрыва на выброс в естественных условиях, когда многие определяющие параметры не известны, не удается построить постаточно понную модель.

Наибольшее распространение получили методы моделирования не всего явления в целом, а отдельных его стадий (частичное моделирование). Результаты такого моделирования важны с точки эрения выяснения наиболее важных особенностей явления, установления определяющих параметров и построения качественных представленый о явления в целом. Количественных ответов частичное моделирование не дает, но оно помогает быстрее и надежнее находить их на базе использования единичных крупных вэрывов. Пример частичного моденирования рассмотрен в работах [1,67]. На основе изучения вэрыва на выброс в лабораторных условиях было установлено [15], что в слабых породах стадия газового ускорения играет определяющую роль по сравнению с волной сжатия. Это позволило создать модель, в которой волна полностью исключена, и все явление выброса целиком имитируется стадией газового ускорения. Результаты, полученные с помощью указанной модели, показали, что такое представление о вэрыве во многих случаях действительно себя оправлывает. К числу примеров частичного моделирования относятся также упомянутые выше результаты исследования [10, 11].

Результаты изучения вэрыва на выброс, которые будут изложены ниже, также представляют примеры частичного моделирования, главная задача которого состоит в выяснения качественных сторои явления подземного взрыва и создании физических представлений о его действия.

1.2. Преобразование энергин газообразных продуктов взрыва в энергию прижения окружающей среды

1.2.1. Постановка задачи и методика исспедования

В задаче о механическом действие вэрыва большой интерес представляет енергия, которая переходит в кинетическую энергию дыжения окружающей среды. Очевидно, преобразование энергии продуктов вэрыва в кинетическую энергию должно зависеть от давления в полости вэрыва: чем больше давление в полости, тем интенсивнее илет передача энергии в окружающую среду. Однако это еще не эначит, что и кинетическая энергия наиболее сильно возрастает на начальной стадии расширения полости. Из опыта известно [15, 52], что именно в самом начале расширения полости в среде происходит интенсивная диссипация энергии. По мере увеличения объема полости диссипация уменьшается. Сножению диссипативных потерь способствует также то обстоятельство, что при взрыве на выброс в среде в определенный момент резко снижаются напряжения за счет действия волны разгрузки от свободной поверхности.

Таким образом, величина кинетической энергии среды будет определяться двумя факторами. С одной стороны, она зависит от энергии, переданной в среду; с другой стороны – от энергии, потеринной в этой среде. Разность этих двух энергий и будет определять приращение кинетической энергии и, в конечном итоге, механический к.п.д. вэрьва. Определение этой разности на различных стадиях расширения продуктов вэрьва и составляет содержание задачи при изучении процесса превращения энергии сжатого газа в энергию движения среды.

Основная трудность решения этой задачи состоит в определении

2-1



Рис. 1. Качественная зависимость энергии, переданной в среду, от времени потерь энергии в среде. В настоящее время прямое определение потерь энергин на различных стадиях развития взрыва представляет довольно сложную задачу. Ее можно решить, если обеспечнть искусственное расчленение во времени процесса передачи энергии от газообразных продуктов в среду. Слематически это показано на рис. 1. Передачу энергин вэрыва в среду можно описать некоторой кривой. Амплитуда Е1 характеризует энергию, которая передается в среду к моменту времени н. Начало координат соответствует моменту детонации заряда, когда вся энергия сосредоточена в газообразных продуктах. При полном

времени расширения полости t_0 в среду будет передано максимальное количество энергии E_0 , которое блязко к полной энергии вэрыва. Представим себе опыт, в котором в момент времени t_1 каким-то образом дальнейшая передача энергии в среду остановлена. При этом произведем измерение кинетической энергии движения среды $E_{\rm K}$. Тогла можно сразу определить коэффициент преобразования энергии продуктов вэрыва в механическую энергию как отношение $E_{\rm K}/E_0$, которое карактеризует среднее значение к.п.д. в интервале времени от 0 до t_1 . Разность $E_1 - E_{\rm K}$ даст эначение диссникрованной энергии. Если теперь провести серию опытов, в которых остановку действия продуктов производить в различные моменты времени, то из нее можно получить к.п.д. и диссипативные потери энергии на различных стадиях расширения продуктов вэрыва.

Остановить действие продуктов на среду в некоторый момент времени удалось путем их выпуска из полости. Схема опытов приведена на рис. 2. Взрыв заряда 1 производился на стальном цилиндре 2. установленном на массивной стальной плите З. В качестве исследуемой среды в опытах использовался мелкий сухой песок плотностью 1,5 г/см³. Поскольку деформации цилиндра и плит пренебрежимо малы по сравнению с деформациями неска, то практически вся энергия вэрыва распределялась в верхнем полупространстве с центром сферической симметрии на границе песок - плита. В плите 4 имеется отверстие, радиус которого больше радиуса стального цилиндра, В результате между плитой и цилиндром образуется кольцевой зазор 5. B течение времени, пока радиус полости 6 остается меньше радиуса цилиндра, вэрыв развивается по законам, соответствующим варыву удвоенного по массе заряда (20) в однородной песчаной среде 7. В момент времени, когда полость достигнет края цилиндра, начнется выход продуктов взрыва из полости в атмосферу. С некоторым приближением можно сказать, что действие продуктов на среду будет остановлено в момент времени, когда радиус полости г примерно будет равен расстоянию до середины кольцевого зазора между плитой и цилиндром. 10

Движение среды будет определяться той работой, которую совершат продукты взрыва при расширенни от начального объема до объема полусферы раднуса R. Величина этой работы легко может быть изменена уменьшением или увеличением размеров шилиндра и кольцевого отверстия в верхней плите. Если раднус шилиндра становится больше максимального раднуса полости, выхода процуктов взрыва чероз кольцевое отверстие не происходит. В этом случае продукты совершают максимально возможную работу над окружающей средой, Практически это соответствует вэрыву на сплошной плите без отверстий.



Рис. 2. Слема проведения опытов с выпуском продуктов детонации из полости

Таким образом, в описанной постановке задачи необходимо определение следующих величин. Во-первых, нужно измерить кинетическую энергию. Для вэрывов на выброс она в первом приближении равна энергии движения выбрасываемой среды. Во-вторых, необхолимо определить внутреннюю энергию продуктов вэрыва E_R в момент времени, когда раднус полости вэрыва будет равен R. Разность между полной энергией взрыва E_0 и величиной E_R как раз и характеризует ту энергию, которая на данной стадии расширения продуктов передана в окружающую среду. И, наконец, в-третьих, существенное значение имеет вопрос о времени истечения продуктов вэрыва, из полости через кольцевое отверстие, которое определяет соотношение между энергией, переданной в среду, и энергией, которая исключается из рассмотрения. Учитывая важность перечисленных вопросов, рассмотрим их более подробно.

Определение кинетической энергии. Толщина слоя песка над зарядом выбиралась с таким расчетом, чтобы в районе эпицентра вэрыва происходило интенсивное вспучивание с последующим образованием воронки выброса.

В опытах было исспедовано три глубины заложения заряда: 35, 55 и 80 мм. Учитывая, что в опытах применялся заряд массой 0,8 г из тена и вэрыв производился на плите, то приведенная глубина запожения для указанных трех случаев составляла 3,0, 4,7 и 6,8 м/r^{1/3}. Эти значения как раз охватывают основной диапазон глубин запожения зарядов при промышленных вэрывах на выброс [15],

Регистрация движения выбрасываемой среды осуществлялась путем ускоренной киносъемкя. Подъем поверхности песка происходит в виде купола. На рис. З показаны очертания этого купола в различные моменты времени для взрыва на сплошной плите. Эпицентральная область сохраняет форму купола в течение довольно продолжительного времени. На рис. 4 приведена завясимость высоты подъема вершины



Рис. З. Контуры купола вэрыва заряда массой 0,8 г на глубине 55 мм в различные моменты времени

купола от времени. Все движение в случае взрыва на цельной плите можно разбить на два основных участка. На первом начальном участке скорость движения примерно постоянна и равна 32 м/с. Через 0,6 мс скорость реэко возрастает (изпом на кривой h (t)) ДO 52 м/с. Эта скорость сохраняется в течение 0,6 - 0,9 мс, а затем начинает постепенно уменьщаться. Особенности кривой h(t) представляют существенный кнтерес и будут подробно рассмотрены при обсуждении результатов. Здесь же необходимо обратить основное внимание на тот параметр, который наиболее полно характеризует механический эффект взрыва. Как уже говорилось выше, в качестве такой характеристики удобнее всего использовать кинетическую внергию, так как она дает прямой ответ на вопрос о к.п.д. механического действия взрыва. О кинетической энергии можно судить по скорости дыжения выбрасываемой среды, которая пегко определяется по графику h (!). Поскольку начальный участок этой зависимости связан с волновыми продессами и не отражает полного механического эффекта вэрыва на выброс, то для характеристики кинетической енергии выбрасываемой среды использовалась максимальная скорость, которая на рис. 4 наблюдается в интервале времени от 0.5 - 0.6 до 1,2 - 1,5 MC.

Согласно работам [15, 52], движение для этого интервала характеризуется практически постоянной скоростью по толщине слоя песка, т.е. скорость на свободной поверхности может использоваться для характеристики движения и внутренних слоев. Для вэрывов в песке на

436

N

основе опыта [52] можно принять, в, им что движение выбрасываемой среды провсходит приблизительно по радкальным направлениям. Отсюда вытекает методика определения кинетической энергии. Весь массив выбрасываемой среды в епицентральной зоне разбивается на ряд конусов. Скорость движения внутря каждого конуса принимается постоянной, а ее величина определяется по скорости смещения свободной поверхности. Общую кинетическую энергию выбрасываемой среды определяли как сумму энергий от-Дельных конусов.

Для упроцения методики подсчета кинетической енергии были проведены также опыты, в кото-



Рис. 4. Зависимость высоты подъема вершины купола от времени при глубине заложения заряда 55 мм:

1 - без выпуска газов из полости; 2 - с выпуском газов из полости

рых свободная поверхность имела сферическую форму (рис. 5). В случае сферической поверхности скорость движения для различных точек етой поверхности практически одинакова. Кинетическая энергия в этом случае легко определяется по формуле

$$E_{\kappa} = \frac{M v_{\max}^2}{2},$$

где *М* - масса всего полусферического объема песка; ч - максимальная скорость движения поверхности.

Спедует заметить, что вэрывы вблизи сферической поверхности интересны не только с методической точки зрения. Как будет видно из результатов, взрывы вблизи плоской и сферической поверхностей отличаются и по существу протекающих в них процессов диссипации внергии. Повтому использование только результатов взрывов вблизи сферической поверхности недостаточно для получения общей картины, и при рассмотрении вопроса о балансе вэрыва на выброс необходим совместный анализ обеих серий опытов.

Энергия продуктов взрыва. Для определения энергия, переданной газообразными продуктами в окружающую среду, необходимо знать количество енергии в продуктах на различных стадиях расширения котловой полости. Вычисление етой энергии производилось по адиабате продуктов вэрыва, полученной в работе [21] для гексогена, который по своим свойствам наиболее близко подходит к тену. На рис. 6 приведена зависимость энергии в продуктах вэрыва от занимаемого ими объема, построенная по указанной адиабате.

Допустим, что необходимо вычислить энергию, которая будет сообщена среде к моменту времени, когда полость будет иметь радиус

(4)



Рис. 5. Схема проведения опытов с массивом песка, имеющего сферическую свободную поверх-HOCTE:

1 - заряд ВВ; 2 - стальной цилиндр; З-опорная плита; 4 - верхняя плита: 5-кольцевое отверстие; представим в виде полусферы 6-полости: 7-массив песка

R. В случае малых значений R. когда попость имеет форму сферы, вычисление объема попости не представляет труда. Однако при больших значениях R расчет усложняется, поскольку попость теряет сферическую форму за счет вспучивания поверхности. Рассмотрим конкретный пример вэрыва на плите. На расстояния R от заряда находится кольшевое отверстие, через которов газы выпускаются из попости, Необходимо найти объем попости к моменту времени, когда вдоль плиты она будет иметь раднус R.

Весь объем полости можно разбить на две части. Первую часть раднуса R, которая образуется и при камуфлетном вэрыве. В про-

цессе образования этой полости произошпо уплотнение среды. Вторая часть рбусповлена вытеснением среды при ее вспучивании в эпицентре над уровнем земной поверхности. В первом приближении можно принять, что при вспучивании плотность среды не изменяется. Тогда, согласно закову сохранения вещества, объем полости вэрыва за счет вспучивания среды в эпицентре увеличится на величину, равную объему вытесненной над первоначальной поверхностью среды. В результате при расширении полости вдоль плиты на расстояние R ее объем будет определяться соотношением

 $V = \frac{2}{3} \pi R^3 + V_K$, (5)

где V, - объем купола, который поднимается над свободной поверхностью к моменту времени, когда раднус попости вдоль плиты будет равен R.

Поскольку размеры полости при взрыве на выброс и при камуфлетном взрыве отличаются между собой незначительно, то для характеристики развития попости вдоль плиты можно использовать зависимость R(t) для полости камуфлетного взрыва - рис. 7 [77] Высота купола и, следовательно, его объем определяются по зависимости h(t) (см. рис. 4) и очертаниям купола (см. рис. 3) для данного момента времени.

Истечение продуктов детонации из котловой полости взрыва, Рассмотрим запачу о вытекании газа из попусферической полости через отверстие площадью 5. Пусть первоначальный объем газа равен Уоз 14



Рис. 6. Зависимость отношения энергии в продуктах к полной энергии вэрыва от относительного радвуса полости

а давление и плотность газа в нем – P_0 и ρ_0 . Изменение массы газа в полости при истечении можно выразить уравнением $dm = V_0 d\rho$. С другой стороны, это же изменение должно равняться массе вытекающего из полости газа $dm = \rho S v dt$, где S – площадь отверстия; v – скорость истечения газа.

Согласно уравнению Бернулли, скорость истечения в кекоторый момент времени связана с давлением формулой

$$v = \sqrt{\frac{2(P - P_a)}{\rho}}, \tag{6}$$

тде Р - давление в полости; Ра - атмосферное давление.

Приняв, что связь между давлением к илотностью газа в попости подчиняется адиабатическому закону, получим

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho S v}{v_0} + \frac{\rho S \sqrt{2(P - P_a)}}{v_0 \sqrt{\rho}}.$$

Отсюда

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\gamma S \sqrt{2} P_0^{1/2} \gamma}{V_0 P_0^{1/2}} P^{1 - \frac{1}{2\gamma}} \sqrt{P - P_p}$$

$$dt = \frac{A \, dP}{P^{1-\frac{1}{2\gamma}} \sqrt{P-P_{a}}} \quad \text{The } A = \frac{V_{0} \, P_{0}^{1/2}}{P^{1/2\gamma} \, \gamma \, S \sqrt{2}}.$$

Раскладывая в ряд выражение $\sqrt{P-P_a}$ к пренебрегая всеми членамя, начиная с $\left(\frac{P_a}{P}\right)^2$ получаем $dt = A - \frac{dP}{\frac{3\gamma-1}{2}} + A \frac{P_a}{\frac{5\gamma-1}{2\gamma}}$.

Проинтегрировав это выражение, получим окончательное выражение

$$t = \frac{V_{0}P_{0}^{1/2}}{P_{0}^{1/2}\gamma_{\gamma}s\sqrt{2}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} P_{0}^{\frac{1-\gamma}{2\gamma}} \left[\left(\frac{P_{0}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right] + \frac{\gamma P_{a}}{3\gamma-1} P_{0}^{\frac{1-3\gamma}{2\gamma}} \times \left[\left(\frac{P_{0}}{P} \right)^{\frac{3\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right] \right\}$$

$$\times \left[\left(\frac{P_{0}}{P} \right)^{\frac{3\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right] \right\}$$

$$(7)$$

Из этой формулы видно, что время истечения газа из полости зависит от площади отверстия и первоначельного давления. Чем больше



Рис. 7. Зависимость радиуса фронта волны $R_{\rm ch}$ (1) и полости взрыва г_п (2) от времени при взрыве заряда из тена массой 1,6 г. в песке 16

отверстие, тем быстрее происходит истечение. Однако применительно к рассматриваемой СХЕМЕ ПОСТАНОВИЕ ОПЫТОВ ВТО заключение не совсем справедпиво, поскольку пнощаль отверстия не может быть задана произвольных размеров. Дело в том, что при расширении котловой попости вдоль плиты отверстие не может быть открыто мгновенно. Время открытия" определяется скоростью расширения стенки полости от внутреннего до наружного края кольцевого зазора. Если при этом учесть, что в процессе открывания отверстия происходит увеличение объема полости, и следовательно, снижение давлення в продуктах вэрыва, то станет очевидно, что при ИСТОЧЕНИИ ГАЗОВ ИЗ ПОЛОСТИ эффективную роль будет играть



Рис. 8. Зависимость максимальной скорости движения вершины купола от площади кольцевого отверстия

не все отверстие, а только некоторая его часть, примыкающая к внутреннему краю. Чтобы оценить величину этой эффективной части, были проведены три серии специальных опытов.

Расстояние от заряда до внутреннего края отверстия во всех опытах первой серии оставалось постоянным и равнялось 18 мм. В результате этого момент выпуска продуктов из полости по отношению к моменту взрыва оставался неизменным, т.е. истечение из полости каждый раз начиналось при одном и том же ее радиусе. Наружный радиус отверстия от опыта к опыту изменялся, что позволяло задавать различные значения площади отверстия. Влияние площали оценивалось по общему эффекту взрыва. В качестве характеристики последного в данном случае использовалась максимальная скорость движения вершины купола, На рис. 8 приведена зависимость максимальной скорости от площади отверстия (кривая 1). Начало координат соответствует нулевому значению площади выпускного отверстия. Другими словами, значение S = O соответствует взрыву около цельной плиты, когда продукты взрыва совершают максимально возможную работу по перемещению среды. В этом случае сбеспечивается и максимальное действие взрыва, которому соответствует скорость движения купола 52 м/с. При площади отверстия, отличной от нуля, максимальная скорость уменьшается. Это означает, что некоторая часть энергии продуктов взрыва, с точки зрения выброса породы, теряется и расходуется на работу против атмосферного давления при расширении через кольцевое отверстие, На эту величину соответственно уменьшается энергия, передаваемая в песчаную среду. Чем больше площадь отверстия, тем интенсивнее выход газов и тем большая доля энергии вычитается из энергии движения среды.

Из рис. 8 видно, что снижение максимальной скорости с увеличением площади отверстия не беспредельно. Примерно при $S=10 \text{ см}^2$ скорость достигает 32 м/с и при дальнейшем увеличении площадь остается постоянной. Как бы ни увеличивалась площадь отверстия, нельзя обеспечить более быстрый, выпуск продуктов взрыва из полости по сравнению с тем, которыя нарионается при $S = 10 \text{ см}^2$. Это означает,

ELKOD.

3-1

что к моменту достижения попостью наружного края отверстия плошадью 10 см² заканчивается истечение продуктов из полости. Отсюда получается простой способ экспериментальной оценки времени истечения газов из полости. В первом приближении он равен времени расширения полости от внутреннего до наружного края отверстия плошадью 10 см². Действительно, представим, что к моменту расширения полости до наружного края указанного отверстия в ней еще сохранилось заметное количество газообразных продуктов. Тогда увеличение плошади отверстия привело бы к еще большему ускорению выпуска газов из полости и, спедовательно, к дальнейшему снижению еффекта взрыва. Но поскольку в вксперименте этого не наблюдается, то остается заключить, что к моменту достижения полостью наружного края отверстия в ней уже не осталось продуктов вэрыва.

Для рассмотренного случая, когда радиус цилиндра равнялся 18 мм, площади отверстия 10 см² соответствовал наружный радиус кольцевого отверстия 25 мм. Для определения времени расширения полости можно воспользоваться зависимостью радиуса полости от времени (см. рис. 7). Согласно етой зависимости, время расширения полости от 18 до 25 мм равно 0,06 мс.

Пользуясь найденным значением вффективной площади отверстия, можно также оценить время истечения продуктов из полости по формуле (7). Результаты оценки приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что рассчитанное по формуле время по порядку величины совпадает с определенным выше значением.

Таким образом, для рассмотренной серии опытов, когда край кольцевого отверствя располагается на расстоянии 18 мм от заряда, продукты взрыва могут быть удалены из полости в течение 0,06 -0,15 мс. Чтобы судить об этой величине, напомним значения общего времени расширения камуфлетной полости взрыва и времени развития вэрыва на выброс. Из рис. 7 видно, что полное время расширения камуфлетной полости взрыва в безграничной песчаной среде при взрыве заряда массой 1,6 г превышает 1,5 мс. Сталия взрыва на выброс. в течение которой происходит ускорение движения выбрасываемой среды за счет продуктов взрыва (см. рис. 4), также длится примерно 1,5 мс. Из этих значений видно, что время истечения продуктов взрыва из полости более чем на порядок меньше полного времени, в течение которого продукты взрыва совершают работу. Это значит, что предложенная методика действительно позволяет осуществлять довольно быструю остановку действия продуктов взрыва не среду и, таким образом, изучать еффективность их воздействия на различных стадиях расширения полости как при камуфистном взрыве, так и при взрыве на выброс.

Рассмотренный пример выпуска продуктов взрыва является наибопее интересным. Он соответствует такой степени расширения котловой полости, когда в продуктах взрыва остается сравнительно мало энергик. При радиусе полости, равном 18 мм (трем радиусам заряда), примерно 85% энергии взрыва уже передано в среду и лишь 15% остается в полости. Это значит, что при выпуске продуктов на более раних стадиях, когда осуществляется основной процесс передачи энер-

36

24

Таблица 1

distances.	Начальное давление в полости Ро, Па				
Показатели	3,5 · 10 ⁸	2,7 · 107	1,8 · 10 ⁶		
Начальный объем по- пости V ₀ , см ³	2,1	12,3	91,0		
Раднус цилиндра, см	1,0	1,8	3,0		
Время истечения, мс	0,05	0,15	0,36		

гик, время истечения, согласно формуле (7) должно быть еще меньше. На более поздних стадкях время должно возрасти. В табл. 1 приведены значения времени истечения газа, определенные по формуле (7), которые как раз и характеризуют это возрастание. Учитывая, однако, приближенность этой формулы, была проведена также экспериментальная проверка. Помимо описанных опытов были проведены еще две серин. В первой из них отверстие имело цилиндрическую форму, а заряд размещался по оси отверстия. Это соответствует наиболее раннему выпуску продуктов взрыва из полости - практически сразу же после выхода детонационной волны на поверхность заряда. Зависимость максимальной скорости движения купола взрыва от площади отверстия для этой серии приведена на рис. 8, кривая 2. Во второй серии выпуск продуктов из полости производился через кольцевое отверстие, Расстояние до внутреннего края отверстия равняпось ЗО мм. Зависимость скорости от площали отверстия в етом случае показана на рис. 8(кривая 3).

Все три кривые при S = О сходятся в одной точке, соответствующей взрыву около цельной плиты. Чем раньше начинается выпуск продуктов из полости, тем сильнее влияние на действие взрыва. Эффективная площадь отверстия в случае выпуска продуктов на самой ранней стадии примерно равна 10 см². При выпуске продуктов на бопее поздних стадиях площадь отверстия, при которой скорость .достигает минимального значения, несколько увеличивается, что согласуется с данными табл. 1 о времени истечения газов из полости.

Таким образом, после исследования вспомогательных вопросов мы подошли к постановке задачи в целом. Чтобы 'решить вопрос о работоспособности продуктов взрыва на различных стадиях их расширения, необходимо осуществить их выпуск при разных значениях енергии. Это достигается путем изменения расстояния от заряда до кольцевого отверстия, которое в опытах изменялось от нуля до величины радиуса камуфлетной полости. Предельным случаем является взрыв на цельной плите без отверстия. В подавляющем большинстве опытов площадь отверстия равнялась около 10 см²,

3-2

1.2.2. Изменение к.п.д. продуктов детонеции в процессе развития вэрыва

Основная серия опытов была проведена при толщине слоя песка над зарядом 55 м, которая соответствует приведенной глубине запожения заряда 4,7 м/т^{1/3}. Рассмотрение результатов целесообразно начать именно с этого случая, а затем дополнить их данными других опытов.

В опытах основной серин исследовалось влияние расстояния от заряда до выпускного отверстия R на характер поднятия свободной поверхности в епицентральной области взрыва. Максимальная скорость движения вершины купола для различных R приведена в табл. 2. Для характеристики повторяемости результатов максимальные скорости для донного значения R (кроме R = ~) приведены по каждому опыту.

На рис, 9 приведена зависимость максимальной скорости от расстояния между центром заряда к серединой кольцевого отверстия. Для каждого значения R проводилось по два-три опыта, Максимальные отклонения отдельных измерений от средних значений скорости, как видно из табл. 2, не превышают 5 - 7%. Минимальное расстояние, при котором измеряпась скорость, равно 15 мм. Оно соответствует опытам на цилиндрическом столбике диаметром 20 мм. В этом случае расстояние до внутреннего края отверстия равнялось 10 мм, а до наружного - 20 мм. Опыты с более тонкими столбиками трудно осуществимы, поскольку в результате взрыва происходит их интен-СИВНОЕ СМЯТИЕ, ЧТО НЕ ПОЗВОЛЯЕТ СЧИТАТЬ ВЗРЫВ ЭКВИВАЛЕНТНЫМ ВЗРЫву на абсолютно жестком основании, В табл. 2, правда, приведена скорость для R = 0. Она соответствует опытам, которые были проведены непосредственно над цилиндрическим отверстием. И хотя в этом случае, безусловно, происходит наиболее ранний выпуск продуктов взрыва из полости, использование полученной в нем скорости при построении зависимости v(R) не представляется возможным, поскольку не ясно, что принимать за величину R .

При увеличении расстояния, как показывает рис. 9, скорость увеличивается. Своего максимального значения (52 м/с) она достигает при R = 50 мм. Такое же значение скорости наблюдается при вэрыве около цельной плиты ($R = \infty$). Это значит, что к моменту времени, когда полость в направлении вдоль плиты достигает радиуса 50 мм, процесс передачи энергии продуктов вэрыва практически завершается.

Изменение скорости, как видно из рис. 9, происходит довольно монотонно во всем диапазоне расстояний от О до 50 мм. Этот диапазон практически охватывает весь инкл активного расширения продуктов вэрыва. Характер изменения өнөргин в продуктах с увеничением объема полости, как видно из рис.6, не является таким же плавным, как зависимость v(R). Чтобы пучше проследить эти различия, рассмотрим изменение не скорости, а кинетической өнергии (рис. 10). По вертикальной оси отложена кинетическая энергия выбрасываемого песка, заключенная в поднимающемся куполе к отнесенная к полной энергии взрыва, по горизонтальной оси – эргумент $1 - E_R/E_0$. Ве-

243(

Таблица 2

Номер опыта	Мако коль	Максимальная скорость (м/с) при расстоянии до середины кольцевого стверстия, мм						
	0	15	21,5	27,5	32,5	38,0	48,5	~
1	14,2	23,2	28,2	36,4	41,0	47,2	48,5	
2	15,5	23,6	29,0	38,0	41,4			
з	16,8	24,0	-		42,5	49,2	52,6	52 ±2,5
4		25	30,0	39,2	43,5			
5		26	32,0		45,5			
6			34.0					

пичина E_R соответствует энергии, которая при данном радиусе попости R содержится в продуктах вэрыва. Спедовательно, аргумент 1- E_R/E_0 характеризует относительную энергию, которая к моменту выпуска продуктов вэрыва из полости передана в среду.

Зависимость $\frac{E_{K}}{E_{0}} = i \left(1 - \frac{E_{R}}{E_{0}} \right)$ является физически более наглядной,

чем зависимость v(R). Различия между некоторыми двумя состояниями 1 и 2 (см. рис. 10) характеризуются вполне определенными физическими параметрами. Так, отрезок АВ определяет ту внергию, которая в промежутке между этими двумя состояниями передана среде газообразными продуктами взрыва, а отрезок *CD* соответствует приращению кинетической энергии движения среды за этот же промежуток времени. Таким образом, наклон кривой в каждой точке харахтеризует коеффициент преобразования энергии продуктов взрыва в механическую энергию движения среды (к.п.д.). Более определенным на этом графике является и начало координат. Если равна нулю переданная в среду энергия, то и кинетическая энергия должна равняться ну-







Рис. 10. Зависимость приведенной кинетической энергии выбрасываемой среды E_i/E₀ от переданной в среду приведенной энергии (1- E_P/E₀) при глубине запожения заряда 55 мм

пю. Повтому зависимость $\frac{E_{\rm K}}{E_0} \left(1 - \frac{E_R}{E_0}\right)$ должна проходить через нача-

по координат.

Нанболее примечательной чертой эависимости $\frac{E_{K}}{E_{0}}(1-\frac{E_{R}}{E_{0}})$ является наличие двух четко выраженных участков, на каждом из которых ее можно в первом приближении представить в виде прямой лиини. Наклон этих линий определяет к.п.д. механического действия продуктов вэрыва. На начальных стадиях расширения продуктов вэрыва к.п.д. равен 0,007, на заключительных стадиях – 0,18, т.е. эффективность использования энергии продуктов вэрыва для совершения механической работы на втором участке возрастает по сравнению с первым примерно в 25 раз.

Чтобы понять причины столь резких различий в коеффициентах преобразования внергии, проведем два сопоставления. Во-первых, сравним рис. 10 и 6. На первом представлена зависимость $\frac{E_K}{E_0} \left(1 - \frac{E_R}{E_0}\right)$, на втором – зависимость $\frac{E_R}{E_0} (V)$. Быстрое изменение к.п.д. механического действия продуктов взрыва происходит при изменении E_R/E_0 от 0.25 до 0.15. Из рис. 6 видно, что примерно при етих же значениях энергии происходит довольно быстрое изменение наклона кривой $\frac{E_R}{E_0} (V)$. На начальном участке при изменении объема 22 полости от объема заряда (0,7 см³/г) до 10 см³/г в среду передается основная доля энергии (≈ 75%). При дальнейшем увеличении объема полости интенсивность передачи энергии в среду довольно резко снижается. Таким образом, из первого сопоставления следует, что к.п.д. повышается примерно на том участке расширения полости, который характеризуется пониженной отдачей энергии в среду. Качественная причина такого совпадения представляется вполне понятной. Более поздние стадии расширения полости характеризуются меньшими давлениями газов в полости и меньшими напряжениями в окружающей среде. Отсюда можно заключить, что относительные потери энергии в среде на этих стадиях могут быть меньше.

Рассмотрим теперь прохождение по среде воли напряжений. Согласно рис. 7, волна сжатия дойдет до свободной поверхности, расположенной на расстоянии 55 мм от заряда, примерно через 0,1 мс. Среда типа песка характерна тем, что волна разгрузки в ней распространяется гораздо быстрее волны нагрузки. Повтому приближенно можно считать, что напряжения в среде между полостью взрыва и свободной поверхностью снимутся в момент выхода волны сжатия на свободную поверхность. Снятие напряжений должно приводить к снижению диссипативных потерь. Поэтому та энергия, которая будет передаваться в среду после ее разгрузки, должна преобразовываться в энергию движения с более высоким к.п.д.

К моменту святия в среде напряжений полость взрыва, согласно рис. 7, будет иметь радиус 22 мм, которому соответствует энергия около 0,15 полной энергия. Это примерно то значение энергии, после которого на рис. 10 наблюдается резкое изменение наклона кривой к увеличение к.п.д.

Таким образом, можно назвать две основные причины изменения к.п.д. механического действия продуктов в продессе развития взрыва на выброс. Первая причина обусловлена свойствами самих продуктов взрыва. Давление в них и, следовательно, напряжение в среде по мере развития взрыва уменьшаются и это может приводить к Снижению потерь внергин. Исходя из природы втого механизма следует, что он должен давать аналогичное изменение к.п.д. и при камуфлетном взрыве. Вторая причина связана с особенностью взрыва на выброс. Наблюдаемое в опытах резкое повышение к.п.д. может быть объяснено уменьшением потерь энергии в среде, вызванным прохождением по ней волны разгрузки. Другими сповами, изменение баланса экергии в среде в процессе развития взрыва на выброс в тюбом случае обусловлено уменьшением потерь энергии. И различие между указанными поичинами состоит в том, что они преднолагают различные механизмы снижения этих потерь. В одном спучае это снижение напряжений в среде происходит за счет уменьшения действующего в попости давления, т.е. в результате разгрузки, идущей от полости; в другом - в результате разгрузки напряженного состояния среды Свободной поверхностью.

1.2.3. Причины изменения к.п.д. на разных стадиях развития взрыва

Чтобы выяснить причины изменения к.п.д. продуктов взрыва в пропессе расширения котловой полости, рассмотрим результаты дополнительных опытов. Прежде всего понытаемся оценить возможность влияния на к.п.д. самих продуктов взрыва. Для этого необходимо поставить опыты, в которых выпуск продуктов из полости можно было бы осуществлять при развитии камуфлетного взрыва. Тогда влияние свободной поверхности исключалось бы из рассмотрения, и все изменение к.п.д. происходило только за счет изменения свойств продуктов в процессе юх расширения.

В качестве первого примера рассмотрим результаты изучения объема камуфлетной полости. Схема опытов приведена на рис. 11. Заряд ВВ массой О,8 г размещался под стальной плитой, которая сверху пригружалась таким образом, чтобы исключить ее смещение в момент взрыва. Действие вэрыва развивалось вниз в сторону влажного песка. Увлажнение песка производилось для того, чтобы придать ему некоторую связность, необходимую для сохранения формы камуфлетной полости после взрыва. При взрыве вблизи цельной плиты образуется полость полусферической формы. Если произвести выпуск продуктов



Рис. 11. Схема проведения опытов по изучению впияния выпуска продуктов на размеры котловой полости при камуфлетном взрыве: 1.-стальная плита; 2.-стальной шилиндр; 3 – заряд ВВ; 4 – кольцевое отверстие; 5 – дополнитепьный груз; 6 – массив влажного песка; 7 – стенки ящика; 8 – легкие металлические пластины; 9 – полость

вэрыва из полости, то ее форма сохранится, а объем уменьшится. Таким образом, описанная схема опыта позволяет определить эффективность работы продуктов камуфлетного вэрыва,

Для характеристики работы продуктов взрыва использовался объем образующейся полости, который определяли непосредственно после снятия плиты. Кроме того, В ОПЫТАХ ИЗМЕДЯЛИ ОСТАТОЧНЫЕ смещения. Для этого в песок перед опытом закладывани петкие металлические пластинки (см. рис. 11), которые при взрыве смещались вместе с песком вдоль плиты. Остаточное смещение определяли по разности расстояний между симметричными лластинками до взрыва и после него. Как следует из работы [46], остаточные смещения достаточно хорошо характеризуют объем . полости варыва,

На рис. 12 приведена зависимость объема камуфлетной попости от аргумента 1- E_R/E_0 . Ее



Рис. 12. Зависимость объема камуфлетной полости от внергии $(1 - E_R/E_0)$, переданной в среду

характер качественно повторяет зависимость E_{κ}/E_0 (1 - E_R/E_0), при-веденную на рис. 10 для вэрыва на выброс. Поскольку объем полости примерно пропорционален энергии взрыва [25], то можно считать, что наклон кривой V (1-E_R/E₀) в каждой точке примерно характеризует в ней к.п.д. продуктов. Из рис. 12 видно, что к.п.д. и при камуфлетном взрыве не остается постоянным в процессе расширения попости. Как и в случае взрыва на выброс (см. рис. 10), он повышается по мере уменьшения в попости энергии. Отсюда следует важный вывод о том, что при передаче энергии в среду от газообразных продуктов подземного вэрыва механический к.п.д. Зависит от давления в этих продуктах (от концентрации энергии): с уменьшением давления к.п.д. возрастает. Физически этот результат представляется понятным и может быть объяснен меньшими потерями энергии при низких давлениях. Следовательно, в общем эффекте возрастания к.п.д. на заключительных стадиях развития взрыва на выброс определенную роль в снижении потерь играет разгрузка массива полостью, в которой со временем падает давление. Однако с количественной точки зрения влияния этого фактора недостаточно для того, чтобы объяснить наблюдаемое возрастание к.п.д. при взрыве на выброс. Так, например, если за меру изменения к.п.д. принять отношение наклонов крито получится спедующая картина, BEIX При камуфлетном вэрыве отношение наклонов _____ на конечном

4-1



Рис. 13. Зависимость кинетической внергии от энергии, переданной в среду для вэрыва в полусфере песка радиусом 75 мм (а) и 55 мм (б)

и начальном участках кривой $V\left(1-\frac{E_R}{E_0}\right)$ примерно равно 14, а при вэрыве на выброс 25, т.е. при вэрыве на выброс х.п.д возрастает сильнее, чем при камуфлетном вэрыве.

Для получения прямых д.казательств влияния разгрузки среды на к.п.д. продуктов взрыва были проведены опыты по схеме, приведенной на рис. 5. Заряд размешали внутри попусферического песчаного объема на границе с массивной плитой (цилиндром). Преимущество этой схемы опытов по сравнению с взрывом вблизи плоской свободной поверхности СОСТОИТ В ТОМ, ЧТО ЗНАЧИТЕЛЬНО упрощаются все явления и обпегчается подсчет кинетической энергии среды, поскольку все точки поверхности двяжутся практически с одинаковыми скоростями.

Было проведено две серии опытов. В первой серии раднус полусферы равнялся 75 мм, во второй - 55 мм. В каждой серии выпуск продуктов взрыва производился одинаковым образом и строилась зависимость кинетической энергии движения всего полусферического объема от параметра 1 - E_R/E_0 . т.е. от величины, переданной в среду энергии. Результаты камерений приведены на рис. 13.

Рассмотрим вначале результаты опытов с полусферой радиусом 75 мм. К моменту времени, когда фронт волны сжатия достигнет свободной поверхности и, отразившись в виде волны разгрузки, дойдет до полости, раднус полости будет равен около 30 мм. Из рис, 13, в видно, что ко времени, которое соответствует $1 - E_R/E_0$, примерно 0,8 - 0,9, среда будет иметь запас кинетической энергии окопо 4,5 - 5,0%. Это тот запас, который приобретен заведомо в усповиях камуфистного вэрыва, Учитывая, что максимальное эначение Е = 6,5%, т.е. близко к указанному значению, можно полагать, что взрыв внутри попусферы радиусом 75 мм по усповиям своего развития близок к камуфлетному вэрыву. Поэтому возрастание к.п.д. в этом случае в основном обусловлено уменьшением давления в полости и связанной с этим разгрузкой массива. Представим теперь, что влияния волны разгрузки от свободной поверхности нет, и все изменение к.п.д. обусловлено только свойствами продуктов взрыва. Тогда уменьшение расстояния до свободной поверхности не допжно изменить степень повышения к.п.д. Поскольку степень диссипации

энергии останется неизменной, а количество переданной в среду энергии одинаково по условиям проведения опытов, то абсолютное эначение кинетической енергии при таком предположении не должно зависеть от радиуса сферического объема песка.

Сопоставление рис. 13, а и б показывает. что это предположение неверно. При радиусе полусферы 55 мм максимальное значение кинетической внергин составляет около 24%, т.е. по сравнению с полусферой радиусом 75 мм энергия движения увеличилась почти в 4 раза. Этот факт прямо указывает на то, что разгрузка среды за счет свободной поверхности охазывает существенное влияние на к.п.д. продуктов взрыва. Отсюда вытекает, что чем ближе свободная поверхность к заряду, тем раньше произойдет разгрузка и, спедовательно, тем большая доля внергии продуктов взрыва будет преобразовываться в энергию движения с повышенным эначением к.п.д.

На рис. 14 приведена зависимость кинетической внергии движения среды от радиуса сферического объема песка [52]. Опыты этой серии проводились с зарядами ВВ массой до 30 г, которые также подрывались внутри полусферических объемов на границе с массивной стальной плитой. Из рис. 14

видно, что кинетическая энергия по мере уменьшения радкуса песчаной полусферы непрерывно увеличивается. Экстраполяция к отношению

 $R/r_3 \approx 1$ дает значение $E_{\rm K}$, близкое к полной энергии взрыва. Примем в качестве к.п.д. отношение приращения кинетической энергии к энергии, переданной в среду. Тогда графики на рис. 13, а и б позволят оценить абсолютные значения к.п.д. на различных стациях расширения продуктов. Зависимость $\frac{E_{\rm K}}{E_0} (1 - \frac{E_R}{E_0})$ для полусфе-

ры раднусом 75 мм в первом приблюжении показывает, в каких пределах может изменяться к.п.д. за счет продуктов взрыва. Максимальное значение к.п.д., которое будет в конце расширения полости, равно 0,20 - 0,25. На начальных стадиях к.п.д. значительно меньше. Так, среднее значение к.п.д. на участке изменения 1 - E_{R}/E_{0} от 0 до 0,6 приблизительно равно 0,01 - 0,02, т.е. только 1 - 2% переданной энергии преобразуется в энергию движения.

При вэрыве внутри полусферы радкусом 55 мм к.п.д. изменяется. Так, из рис. 13, б видно, что после разгрузки массива к.п.д. равен 1. Это значит, что после снятия в среде напряжений оставшаяся к этому времени в полости энергия продуктов вэрыва практически полностью переходит в энергию движения. Необходимо обратить внима-



Рис. 14. Эевисимость кинетической энергии движения сферического объема песка от радиуса этого объема при варыве зарядов в центре сферы

ние, что приведенные данные о эначениях к.п.д. справедливы только для случая взрыва в сферическом объеме.

Таким образом, в изменении к.п.д. продуктов взрыва обе причины разгрузки массива играют важное значение. Преобладание каждой из них при прочих равных усповиях будет определяться степенью загпубления заряда по отношению к свободной поверхности. С уменьшением глубины роль разгрузки массива за счет свободной поверхности возрастает. Рассмотренный пример заглубления заряда массой 0,8 г 55 мм в песке соответствует приведенной глубине запожения на 4,7 м/т1/3. Для лабораторных условий опытов ето оптимальная глубина, для которой наблюдается максимальный эффект выброса. Для нее, как следует из приведенных выше цифр, за счет влияния свободной поверхности к.п.д. повышается в 4 - 5 раз. Попусфера радиусом 75 мм соответствует приведенной глубине около 6,5 м/т1/3, которая является почти предельной глубиной для вэрывов на выброс. В этом случае к моменту разгрузки массива почти вся энергия продуктов вэрыва уже оказывается израсходованной. Для таких глубин роль разгрузки от свободной поверхности незначительна, и к.п.д. определяется в основном свойствами продуктов вэрыва в полости. В целом при рассмотрении вопроса о роли этих двух факторов кроме глубины надо учитывать и свойства среды. Одной из наиболее важных харахтеристик, по всей вероятности, являются скорости распространения объемных волн, поскольку от них в сильной степени зависит продолжительность пребывания среды в напряженном состоянии.

1.2.4. Особенности вэрыва вблизи плоской свободной поверхности

Вэрыв вблизи плоской поверхности по своей природе подобен взрыву внутри сферического объема, поскольку при нем после выхода волны сжатия на свободную поверхность также начинается разгрузка массива среды над зарядом. Поэтому качественно все явления при нем будут подобны рассмотренным выше. Различия будут иметь в основном количественный характер. Это связано с тем, что разгрузка массива происходит неравномерно со всех сторон заряда. Раньше других будет разгружена среда в направлении к свободной поверхности, в результате чего расширение полости после некоторого момента времени становится несимметричным. Преимущественно полость расширяется в сторону свободной поверхности, что обеспечивает и усиленную передачу в этом направлении энергии продуктов взрыва. Это первая особенность взрыва вблизи плоской поверхности.

Вторая особенность обусповлена сложным характером движения среды. Наибольшая скорость движения среды наблюдается по линии наименьшего сопротивления. По мере удаления от этой линии скорость уменьшается. В результате среда в эпщентральной зоне поднимается в виде купола, внутри которого скорость уменьшается от вершины к его основанию. Наличие градиента скоростей движения может привести к дополнительным потерям энергии. В случае вэры-



Рис. 15. Схема для определения угла, в пределах которого происходит выброс среды:

1 – очертания купола; 2 – начальное положение плоской свободной поверхности; 3 – часть сферического объема, которая находится в пределах конуса выброса; 4 – образующие конуса выброса

ва внутри сферического объема эти градиенты отсутствовали, и поспе разгрузки потери внергии в среде практически прекращались.

Рассмотрим указанные особенности более подробно. Для этого сопоставим вначале результаты взрывов на глубине 55 мм и внутри полусферы радиусом 55 мм. Максимальная скорость двюжения среды по л.н.с., как было показано выше, равна 52 м/с. Напомним, что эта скоррсть сортветствует взрыву на цельной плите. Сферическая свободная поверхность при взрыве такого же заряда на плите движется со скоростью 64 м/с. Допустим, что при взрыве около плоской поверхности энергия равномерно распределяется по всем направлениям. Тогда исньшее значение скорости движения в этом случае означает более интенсивные потери энергии. Если при этом учесть, что за счет неравномерного расширения продуктов в случае взрыва около плоской поверхности по направлению к вершине купола передается относительно большое количество энергии, то различия в потерях энергии станут еще более очевидными. При вэрыве внутри полусферического объема практически вся среда вокруг заряда разбрасывается продуктами детонации, т.е. энергия распределяется на весь объем попусферы. В случае взрыва вблизи плоской поверхности выбрасывается среда только в пределах некоторого конуса (рис. 15). Поэтому при сопоставлении рассматриваемых двух случаев сравнение кинетических внергий целесообразно производить именно в пределах этого конуса,

Таблица З

Усповия взрыва	$\frac{E_{\kappa.\pi}}{E_0}$ %	$\frac{E_{\text{KaC}}}{E_0}$, %	<u>Ек.с</u> Ек.п
На цельной плите	3,1	8,0	2,6
На пилинаре диаметром 20 мм	0,6	2,2	3,7

Размеры конуса определяются радиусом основания купола. Если образующие конуса провести из центра заряда к граниде основания купола (см. рис. 15), то объем полусферы внутри такого конуса составит примерно 30% всего объема полусферы.

При дальнейшем сопоставлении для вэрыва около плоской поверхности будет приниматься кинетическая энергия поднимающегося купола, а для вэрыва внутри полусферы – кинетическая энергия среды, движущейся в пределах конуса выброса. Значения подсчитанных таким способом кинетических энергий, отнесенных к полной энергии вэрыва, приведены в табл. З.

Взрыв на цилиндре диаметром 20 мм - это взрыв с выпуском продуктов взрыва из полости. При этом важно подчеркнуть, что выпуск производился до момента выхода волны на свободную поверхкость. Это значит, что полость взрыва на стадии передачи энергии в среду имела форму полусферы и по всем направлениям было передано олинаковое количество энергии. Спедовательно, среда в пределах конуса выброса получила одно и то же количество энергии как при взрыве внутри попусферы, так и около плоской поверхности. Поэтому все различия в величинах кинетических энергий движущейся среды обусповлены потерями энергии в среде, Как видно из табл, З, энергия двюжения при взрыве около плоской поверхности оказалась меньше в 3,7 раза. Поскольку до момента выхода волны сжатяя на поверхность все явления в обонх случаях развивались одинаково. то все различия накопились в процессе куполообразного поднятия поверхности. Если энергию движения в момент начала подъема купола принять за единицу, то в результате развития купола 73% этой энергии будет потеряно и только 27% сохранится в виде энергии движения.

При взрыве около цельной плиты отношение между кинетическими энергиями в рассматриваемых двух случаях, как видно из табл. З, равно 2,6, т.е. заметно меньше, чем в предыдущем случае. Относительное увеличение энергии движения при взрыве около цельной плиты объясняется отмечавшимся выше фактом несимметричного расширения полости при куполообразном поднятии среды, в результате которого в сторону выбрасываемой среды передается относительно больше энергни по сравнению с другими направлениями. Наиболее наглядно это видно по степени возрастания энергии движения на стадии газового ускорения. Так, кинетическая энергия после выхода волны скатия на поверхность при взрыве внутри полусферы увеличивается в 3,6 раза, а для плоской поверхности - в 5,2 раза.



Рис. 16. Зависимость кинетической энергии выбрасываемой среды от энергии, переданной в среду, при глубине заложения заряда 80 мм

Для определения особенностей вэрыва вблизи плоской поверхности на различных глубинах была проведена дополнительная серия опытов, в которой заряд помещали на глубину 80 мм. Все подсчеты кинетической внергии движения для втой глубины аналогичны приведенным выше. Результаты обработки показаны на рис. 16. Для сопоставления с результатами втой серии можно использовать данные о вэрыве внутри полусферы радиусом 75 мм. Сравнительные эначения кикетической внергии приведены в табл. 4.

По данным табл. 4 можно сделать два вывода. Во-первых, практически нет различий в отношении $\frac{E_{K,C}}{E_{K,R}}$ для различных условий вэрыва. Это связано с тем, что при такой большой глубине запожения заряда, как отмечалось выше, к моменту выхода волны сжатия на свободную поверхность практически вся энергия продуктов оказывается уже переданной в среду. Поэтому передача энергия происходит равномерно по всем направлениям независимо от формы свободной поверх-

ности. Во-вторых, абсолютная величина отношения К.С для глу-

бины запожения заряда 75 - 80 мм оказапась заметно меньше, чем для глубины 55 мм. Это означает, что потери энергии в процессе куполообразного поднятия среды при взрыве на выброс зависят от градиента скорости. С увеличением градиента потери возрастают. Зависимость энергии диссипации от скорости движения частиц свидетельствует о том, что среда в процессе выброса по своему поведению аналогична жидкости.

Таблица 4

Усповия вэрыва	$\frac{E_{\text{K-R}}}{E_0}, \%$	Ε <u>κ.c</u> ,%	<u>Ек.с</u> Ек.п
На цельной плите	1,0	2,2	2,2
На пилиндре диаметром 20 мм	0,38	0,8	2,1

1.2.5. Возможности повышения эффективности использования энергии вэрыва

Энергия вэрыва находит широкое применение в самых различных отраслях науки и народного хозяйства. Преимущественным аспектом ее использования является механическое действие взрыва. Вместе с тем коэффициент полезного использования энергии взрыва для совершения механической работы является довольно низким. Максимальный к.п.д. составляет 10 - 15%, в то время как основная доля энергии непроизводительно расходуется на разогревание среды. Причина столь низкого к.п.д. обусповлена высокой концентрацией энергии взрыва и большими скоростями ее выделения, в результате которых в среде происходят сильные необратимые деформации. В большинстве случаев эти деформации являются побочным нежелательным явлением.

Проведенные исследования процесса передачи энергии продуктов взрыва в среду и некоторых вопросов ее диссипации поэволяют наметить несколько путей повышения эффективности использования энергии взрыва. Преимущественно они касаются случая взрыва на выброс, хотя в эначительной степени относятся и к другим способам использования взрывной энергии.

Первый путь предусматривает использование зависимости к.п.д. продуктов взрыва от их параметров. Наибольшие потери знергии наблюдаются на самых начальных стаднях расширения полости взрыва. когда давление в ней особенно велико. Отсюда вытекает, что снижением начального давления в полости взрыва можно повысить эффективность действия продуктов. Начальное давление, действующее на границе полость - среда, можно регулировать изменением начального объема полости. Увеличение объема при неизменном значении выделившейся энергии означает силжение начального давления и, следовательно, повышение к.п.д. продуктов с самого начала их воздействия на среду.

Графики на рис. 6, 12 позволяют оценить начальный объем полости, который может дать существенное увеличение аффекта механического действия взрыва. Из них видно, что особенно низкие к.п.д. наблюдаются при расширении полости взрыва до десяти объемов заряда. Десятикратное расширение объема полости снижает давление в ней приблизительно до 2.10⁸ Па. При этом значительная часть потерянной внертии оказывается в виде тепла, заключенного в разогретой твердой среде. Для совершения механической работы эта энергия

не может быть использована. Представим теперь, что вэрыв производится в полости с воздушным зазором между зарядом и средой. При десятикратном расширении продуктов в воздухе в них останется такое же количество энергии, как и при аналогичном расширении в твердой среде. Однако при взрыве в полости энергия передается вначале находящемуся там воздуху. При этом она также может быть разделена на кинетическую энергию движения массы воздуха и энергию, затраченную на его разогревание, С точки эрения совершения работы над окружающей твердой средой, оба эти вида энергии спедует рассматривать как равноправные. Разогретый воздух также способен совершать работу, как и продукты взрыва. Поэтому нока взрыв развивается его энергию можно считать неизменной и равной BHYTOH HONOC'I полной энергии. Если далее принять, что существенное повышение к.п.д. продуктов начинается при давлениях 2.108 Па, то необходимый объем полости можно оценить по формуле

$$V = \frac{E_0(\gamma - 1)}{P},$$

где E₀ - полная энергия; P - давление, равное 2 · 10⁸Па.

Согласно проведенной оценке, существенного повышения эффекта взрыва следует ожидать, когда объем полости будет превышать объем заряда в 20 - 30 раз.

Описанный способ повышения эффективности использования энергии вэрыва не является новым. Влияние воздушных промежутков вокруг заряда было замечено давно. Еще в 1960 г. появилась экспериментальная работа [18], в которой подробно изложены результаты исследования этого эффекта. В последующие годы были проведены новые исследования [17, 51], которые расширили представления о механизме влияния воздушных полостей на эффект взрыва. Целью дополнительных исследований, результаты которых изложены выше, является выяснение физического существа обнаруженного ранее эффекта влияния воздушных полостей.

Второй способ повышения эффективности использования энергии вэрыва может быть основан на факте реэкое повышения к.п.д. продуктов детонации после разгрузки вэрываемого массива. Из изложенного выше видно, что основная часть энергии движения приобретается средой уже после прохождения волны разгрузки. И несмотря на то, что среде 'на этой стадии передается сравнительно небольшая доля энергии, благодаря сравнительно высокому к.п.д. она обеспечивает основной запас кинетической энергии. Спедовательно, если обеспечить подвод энергии в полость вэрыва на заключительной стадии ее развития, то использование энергии будет идти более эффективно по сравнению с тем случаем, если эту же энергию ввести в полость с самого начала расширения продуктов взрыва.

Реализовать такую возможность можно следующим образом. Пусть имеется два заряда, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Вначале взрывается первый заряд. Он образует полость и обеспечивает начальную стадию подъема купола. После то-

5-1

33

(8)

го, как волна разгрузки дойдет до полости, вэрывается второй заряд. Расстояние между зарядами должно быть выбрано с таким расчетом, чтобы второй заряд к моменту вэрыва находился вблизи стенки попости первого взрыва. В етих условиях будет обеспечен довольно быст. рый прорыв продуктов второго взрыва в полость, где к етому времени уже сложниксь условия для более продуктивного использования их энергии. Практически, очевидно, что можно взрывать вначале некоторый основной заряд, а вокруг него располагать целую серию более мелких зарядов. Соответствующим интервалом замедления можно обеспечить поочередное взрывание дополнительных зарядов с таким расчетом, чтобы продукты их взрыва поступали в полость основного заряда в течение всего времени развития выброса.

По величина основной заряд может превосходить дополнительные. Однако поскольку суммарный к.п.д. вспомогательных зарядов выше, то эффект их воздействия может превосходить действие основного заряда. При этом расчет основного заряда, по всей вероятности, должен производиться таким образом, что один он не в состоянии обеспечить эффект выброса. И только суммарное действие всех зарядов должно приводить к образованию воронки. Необходимо только отметить, что при вэрыве дополнительных зарядов будет происходить частичное гашение движения, созданного основным зарядом. Поэтому при практическом осуществлении этого метода следует обратить особое внимание на выбор оптимальных условий расположения зарядов.

Перспективность второго пути повышения эффективности может проявиться при взрывах как групповых рассредоточенных, TAK H COсредоточенных зарядов. При этом необходимо подчеркнуть, что способ вэрывания последующих зарядов вблизи попости предыдущих может быть успешно использован не только при взрывах на выброс. По сушеству взрыв заряда вблизи некоторой полости в какой-то степени эквивалентен вэрыву в среде с воздушными промежутками между зарядом и средой. Перераспределение продуктов внутри полостей приведет к снижению давления в попости второго взрыва. Интервал замедления может быть выбран таким образом, что повышение давления в попости, образуемой от предыдущего взрыва, не только не понизит эффективность их работы, но в определенных условнях может даже повысить. Это по существу первый способ повышения вффективности взрыва, который описан выше. Предыдущий взрыв как бы создает полость, вблизи которой производятся последующие вэрывы. Это дает возможность использовать такой способ не только аля вэрывов на выброс, но и для взрывов рыхления или даже камуфлетных вэрывов.

Описанные два фактора (снюкение концентрации энергии и производство вэрыва в разгруженном массиве) являются основными и в том или ином виде выступают в разпичных конкретных способах повышения эффективности использования энергии вэрыва. При вэрывах на выброс, например, наиболее существенным является, очевидно, снижение концентрации энергии путем ее перераспределения. Вэрывы с целью дробления горной породы должны, по всей вероятности, больше учитывать явление снижения потерь энергии за счет предварительного
разгружения (растяжения) массива. На этом принципе в основном базируется способ короткозамедленного взрывания.

И, наконец, еще один путь повышения эффективности использования энергии вэрыва - правильный выбор материала и способа забойки подводящих к заряду выработок. Из практики ведения вэрывных работ Известно, что по этим выработкам довольно часто наблюдается интенсивный выход газообразных продуктов взрыва. При этом в атмосферу выбрасывается некоторое количество ' энергии, которая при определенных условиях могла бы использоваться пля совершения механической работы. Вопрос о том, оказывает ли этот выброс продуктов влияние на эффект взрыва и в какой степени, зависит, очевидно, от усповий проведения взрыва. Для взрыва на выброс, в частности, этот вопрос имеет существенное значение и в принципе может быть решен на основании приведенных выше данных пабораторных исследований. Для этого могут быть использованы данные вэрывов над цилиндри- . ческими отверстиями в плите, через которые выпускали продукты вэрыва (табл. 5).

На рис. 17 приведена зависимость квадрата максимальной скорости движения вершины купола от илощади отверстия, по которому производился выпуск продуктов в атмосферу. Квадрат скорости характеризует кинетическую энергию движения среды, поэтому изменевие этого параметра дает представление о степени влияния выхода продуктов взрыва на такие величины, как объем образующейся воронки или массу выброшенной взрывом породы. График на рис. 17 приведен в безразмерных координатах, что поэволяет оценить рассматриваемый эффект для взрывов пюбого масштаба.

Начало координат соответствует нулевому эначению илощади отверстия, через которое производится выпуск продуктов. В этом случае энергия взрыва полностью используется для совершения работы по перемещению среды. Изменение эффекта взрыва с возрастанием площади отверстия происходит неравномерно. Так, при изменении площади отверстия от О до 60 мм²/г^{2/3} величина v², пропорциональная кинетической энергии, уменьшилась в 3 раза, в то время как при дальнейшем увеличении площади до 400 мм² эффект взрыва снизился примерно в 2 раза. Это эначит, что на эффект взрыва может. оказать влияние даже относительно малое отверстие.

Рассмотрим этк результаты применительно к крупным вэрывам. В качестве примера возьмем данные Байцазинского вэрыва [59.]. Заряды ВВ при этом вэрыве закладывались через горизонтальные: штольни площадью сечения около 5 м². Масса отдельных зарядов изменялась от 10 – 50 до 500 – 600 т. что соответствует изменению относительной площади сечения подводящих штолен примерно от. 6 до 100 мм²/г²/3. Из рис. 17 видно, что при таком изменении площади возможно снижение эффекта взрыва в 1,3 – 3,0 раза. С практической точки эрения это довольно значительное снижение и поэтому необходимо остановиться на полученных цифрах более подробно: Основная погрешность при пересчете от пабораторных опытов к натурным могла появиться за счет влияния свойств породы. Байпазинский взрыв производился в скальных породах, в то время как данные .

5-2

Таблица 5

Показатели	Площадь отверстия, мм ²						
	0	100	700	1250	3850		
Квадрат максимальной скорости купола v ² ,м ² /c ²	2700	900	400	225	225		
Относительная площадь отверстия <u>S</u> , мм ² /г ² /3	ο	60	420	750	2300		

на рис. 17 получены при взрыве в песке. Продукты взрыва в крепких породах расширяются в меньшей степени, а это значит, что для одних и тех же моментов времени при взрыве в крепких породах в полости будет относительно более высокое давление, чем при взрыве в



Рис. 17. Зависимость квадрата максимальной скорости купола от площади цилинарического отверстия, через которое вытускаются газы из полости спабых породах. Следовательно, и скорость истечения газов из полости при взрыве в крепких породах должна быть выше, Исходя из этих соображений, можно ожидать, что влияние забойки наиболее существенно при взрывах в крепких породах. В этом смысле результаты вэрывов в песке при прочих равных усповнях могут быть использованы для оценки минимально возможного эффекта. При этом спедует заметить, что в слабых породах большое значение имеет эффект захлопывания подводящей выработки в резупьтате сильного смятия породы, который делает невозможным сколько-нибудь существенное истечение газов из полости. В модельных опытах с песком этот фактор был исключен, поскольку канал, по которому производился выброс газов на попости, проходил в стальной плите и сохранял свое сечение неизменным в течение всего времени истечения.

Таким образом, третий путь повышения эффективности вэрыва касается в основном вэрывов на выброс в крепких скальных породах.

Для них в случае вэрыва без забойки или с плохой забойкой возможно значительное истечение продуктов через подводящие выработки к снижение эффекта вэрыва. Путем илотной закупорки этих выработок эффект вэрывов на выброс может быть значительно повышен. Проверка этого вывода на взрывах зарядов массой 10 - 100 т в скальных породах, результаты которых будут изпожены в подразделе 2, подтвердила возможность повышения эффекта взрыва на выброс за счет улучшения качества забойки.

1.3. Механизм образования видимой воронки выброса

Видимая воронка выброса, как правило, имеет харахтерную чашеобразную форму. Центр размещения заряда при втом очень часто оказывается внутри разрушенной породы. Так, например, при ядерном вэрыве Седан заряд был на глубине 194 м, а максимальная глубина видимой воронки получилась равной 97 м. Вместе с тем совершенно очевидно, что в процессе развития взрыва на выброс на начальных стадиях образуется сферическая полость, заполненная газообразными продуктами взрыва, которая сохраняется в течение некоторого времени и после прорыва купола и выхода газов из полости. В указанном выше примере для вэрыва Седан радиус полости был близок к 80 м. Это значит, что в процессе развития взрыва был момент времени, когда глубина образовавшейся выемки достигала 270 - 280 м. И тот факт, что окончательная глубина воронки не превышает 100 м, свидетельствует о значительных масштабах обрушения бортов первоначальной выемки, в результате которого глубина уменьшилась в 2.7 - 2.8 раза.

⁴ Аналогичную оценку можно провести и для химических вэрывов. Так, в опытном 1000-тонном вэрыве [15] заряд размещался на глубине 40 м. Показатель простреливаемости грунтов, в которых производился втот вэрыв, равен 0,25 м³/кг. Это значит, что при вэрыве заряда массой 1000 т образовалась котловая полость, радиус которой превышает 30 м, т.е. на начальных стадиях развития вэрыва на выброс был момент времени, когда глубина выемки была больше 70 м. Однако в последующем произошло обрушение бортов этой выемки и максимальная глубина окончательной видимой воронки сказапась равной 32 м.

Чтобы лучше понять механизм образования вилимых воронок, рассмотрим вначале результаты опытов; в которых явление оползания практически полностью отсутствует и охончательная видимая воронка максимально близка по форме к той выемке, которая образуется непосредственно в результате взрыва [53]. Эти опыты были проведены в пабораторных условиях. Вэрывы зарядов из тена массой 0,2г проводились в пластичной среде типа пластилина на различных расстояниях от горизонтальной свободной поверхности. Поскольку оползание бортов в такой среде при пабораторных масштабах опытов отсутствует, то в них удалось наблюдать форму воронки без оползневых явлений. В дальнейшем такую воронку будем называть <u>истинной</u>.



Рис. 18. Фотографии разрезов воронок при взрыве заряда массой 0,2 г в пластилине на глубине: в - 24 мм; б - 33 мм; в - 40 мм; г - 45 мм; д - 55 мм

Фотографни разрезов истинных воронок в пластилине при взрывах на различной глубине приведены на рис. 18, из которого видно, что истинная воронка имеет чашеобразную форму только при сравнительно малых глубинах заложения заряда. При глубинах 4 - 7 м/т^{1/3}, которые как раз наиболее типичны в практике взрывов на выброс, воронки вблизи свободной поверхности имеют практически вертикальные стенки и по форме напоминают ципиндр, в нижней части плавно сопряженный с полусферой (рис. 18, б,в). Радиус этой полусферы совпадает с радиусом камуфлетной полости. Максимальная глубина истинной воронки равна глубине заложения заряда плюс радиус камуфлетной полости.

На рис. 19 показаны траектории движения отдельных точек среды вблизи заряда при взрыве на выброс в пластилине, которые получены опытным путем[40]. Из них видно, что на начальных участках движение частия среды происходит по радиальным направлениям, Однако в дальнейшем траектории отклоняются в сторону свободной поверхности. Это особенно заметно по движению точек, расположенных непосредственно над зарядом, характерно изменение направления движения на 180°. Приведенные на рис. 19 траектории дают представление о перераспределении среды вокруг заряда к моменту образования истинной воронки. В вертикальном направлении вдоль бортов истинной воронки происходит замещение одних участков другими. Слон вблизи свободной поверхности поднимаются над нею и в дальнейшем отрываются от массива и выбрасываются за пределы воронки. На их место из инжних горизонтов подимыются другие спон. Из этого перераспределения видно, что механизм образования воронки, имеющей в верхней части цилинарическую форму, довольно сложен. Образование такой воронки не означает, что выбрасывается только сре-



Рис, 19. Траектории перемещения отдельных точек среды вблизи попости (4) при вэрыве заряда (1) массой 0,4 г на глубине 40 мм (Цифры 2, 3 около начальных положений точек обозначают частоту в килогерцах, с которой отмечены положения втих точек)

да, расположенная непосредственно под котловой полостью, в то время как весь остальной массив породы остается на месте. В действительности значительные перемещения наблюдаются к за пределами воронки.

Рассмотрим теперь результаты опытов, в которых имело место обрушение бортов истинной воронки. На рис, 20 приведен разрез воронки, полученной при вэрыве заряда массой 10 кг в лёссовидных сутлинках на глубине 1 м [15, 66]. Для изучения перемещения породы в этом опыте заранее в различные точки будущей воронки закладывались индикаторы в виде ампул с радиоактивным веществом, которые после опыта легко находились в навале выброшенного грунта или внутри воронки. Зачерненными кружочками показано начальное положение ампул, крестиками – конечное положение. Начальное и конечное положения ампул соединены линиями. Начальное местоположение ампул, выброшенных за пределы воронки, отмечено кружочками без указания конечного их положения. Из рис, 20 видно, что практически весь грунт, первоначально расположенный внутри видимой воронки, оказался выброшенным за ее пределы.

Значительный интерес представляет также распределение грунта внутри воронки. Характер перемещения отдельных точек внутри воронки, если судить о нем по начальному и конечному положению ампул, представляется непонятным. Так, например, точка а, которая рас-



Рыс. 20. Разрез воронки при взрыве заряда массой 10 кг в суглинках:

1 - положение заряда; 2 - профиль видимой воронки; 3 - оркентировочный профиль воронки сразу после прорыва купола; 4 - граница зоны раздробленного грунта; 5 - примерная траектория движения точки а в процессе расширения газов; 6 - примерная траектория перемещения точки а при обрушении бортов воронки

полагалась на уровне заложения заряда на расстоянии 0.4 м, после взрыва охазалась значительно ниже своего первоначального положения. Исходя из траекторий движения, можно ожидать, что эта точка должна была испытать значительное радиальное смещение. О величине этого смещения можно судить по размерам котповой полости (пунктирная линия на рис. 20). Объем грунта, который до взрыва был заключен в сферу раднусом 0,4 м, после взрыва должен распределяться вблизи стенки котловой полости в виде тонкого слоя толщиной в несколько сантиметров. Кроме радиального смещения, точка а должна была также сместиться вверх. Орнентировочное положение этой точки к концу стадии расширения продуктов взрыва отмечено треугольником. Объясныть конечное положение етой точки можно только поспедующим явлением оползания. Аналогичные построения можно выполнить и для траекторий других ампул, оказавшихся в воронке. Соответствие между их начальным и конечным попожениями может быть петко установлено, если допустить образование первоначальной истинноя воронки примерно цилиндрической формы. Ориентировочные контуры этой воронки также показаны пунктирной линией.

Схема образования видимой воронки показана на рис. 21. Из него видно, что непосредственно после взрыва в периферийных участках будущей видимой воронки находился грунт, поднявшийся из нижних горязонтов, в то время как первоначальный грунт из этой области был подият над поверхностью зехти. В последующем этот поднятый грунт



Рис. 21. Схема видимой и истинной воронок:

1-профиль истинной воронки; 2-профиль видимой воронки после отолзания бортов истинной воронки; 3-траектории движения внутренних точек при вэрьше на выброс (стралками указаны радиальные направления движения)

был выброшен за пределы воронкя. Следует заметить, что фактическая форма истинной воронки является более сложной и представление ее в виде цилиндра является приближенным.

Оползание бортов воронки развивается эначительно медленнее по сравнению с разлетом купола. Процесс превращения истинной воронки в видимую наиболее наглядно можно наблюдать в сыпучей среде типа сухого песка. На рис. 22 приведены последовательные кадры обрушения цилиндрической выемки, которая создавалась после удаления некоторого шилиндрического тела.Изменение формы первоначальной выемки начинается в основном с ее нижней части, которая заполняется осыпающимся с бортов песком. К концу этот процесс стремительно нарастает. За счет столкновения части песка образуется характерная кумулятивная струя, которая поднимается над поверхностью. После ее разрушения в центральной части видимой воронки образуется холмик, который иногда наблюдается и в реальных воронхах после вэрывов.

Обрушение бортов выемки происходит таким образом, что слои песка и после обрушения остаются примерно параллельными между собой и отчетливо прослеживаются в зоне обрушенного песка. Такое же явление наблюдается и при реальных вэрывах на выброс. Обычно в зоне разрушенного грунта внутри воронки отчетливо прослеживается слоистая структура, характерная для ненарушенного массива, хотя при взрыве в процессе образования воронки некоторый объем породы непосредственно над котловой полостью выбрасывается, а слои разрываются между собой. В дальнейшем, в процессе обрушения бортов первоначальной воронки разорванные слок вновь соединяются между собой в зоне разрушенного грунта, при этом происходит как бы их проседание.

Π





Таким образом, процесс создания видимой воронки при взрыве на выброс можно разделить на две стадия. Первая стадия состоит в образовании истинной воронки, Эту стадию можно назвать активной, так как на ней продукты вэрыва совершают работу по деформированию и перемещению породы. Вторая стадия - это оползание бортов истинной воронки. Ее можно считать пассивной, так как все движение на ней происходит за счет силы тяжести. С точки зрения изучения закономерностей образования воронки наибольший интерес представляет первая стадия. Действительно, истинная воронка является непосредственным результатом действия вэрыва. В ее формировании важную роль играют как параметры продуктов взрыва, так и физико-механические характеристики среды. В частности, на параметры истинной воронки прямое влияние оказывают размеры камуфлетной полости взрыва. Что же касается второй стадии - оползания бортов истивной воронки. то этот процесс в значительной степени подвержен влиянию случайных факторов. Соотношение между радиусом и глубиной видимой воронки, например, зависит от способности породы к осыпанию, т.е. от степени ее раздробленности, размеров зоны разрушений в т.п. Если судить по видимой воронке, то наиболее объективной характеристикой вэрыва на выброс является, очевидно, ее объем.

На основании вышеизпоженного истинную воронку выброса можно приближенно представить в виде цилиндра радвусом г_П и высотой h₃, равной глубине запожения зарядв, который в нижней части плавно сопряжен с полусферой радиуса г_П. При этом параметры истинной воронки могут быть легко определены с помощью соотношения

$$V_{\rm B} = \frac{2}{3} - \pi r_{\rm R}^3 + \pi r_{\rm R}^2 h_3 , \qquad (9)$$

где V_в - объем видимой воронки.

В основе этой формулы заложено предположение, что объем воронки не изменяется при изменении ее формы. Это допущение легко принять, если учесть, что изменение формы воронки происходит за счет перераспределения разрушенной породы. К моменту образования истинной воронки порода вокруг нее уже претерпела основные деформации, в результате чего она разрушилась и разрыхлилась. При обрушении этой разрушенной породы, по всей вероятности, не происходит существенного изменения ее удельного объема.

Формула (9) позволяет определить раднус г для всех проведенных взрывов на выброс, для которых известен объем видимой воронки. Возможно и решение обратной задачи: если известен радиус камуфлетной полости взрыва, то при заданной глубине заложения заряда можно определить объем видимой воронки выброса. В табл. 6 приведены значения вычисленных таким способом объемов воронок для некоторых ядерных взрывов. При вычислении использовались только взрывы, которые проводились на достаточно больших глубинах (4 - 7 м/т^{1/3}). Сравнение истинных объемов воронок и вычисленных по формуле (9) показывает их хорошую сходимость, что свидетельствует о правильности развитых выше представлений о механизме образования видимой воронки. И хотя истиная воронка не имеет строго цялиндрической формы, вычисление ее объема по радиусу ка-

6-2

Таблида 6

Варыв	Мощность вэрыва, вт	Глубина эа- пожения л _Э м	Объем во- ронкн V,м ^З	Раднус камуфлет- вой полос- ти г _п , м	$\frac{2}{3}\pi r_{\Pi}^{3} + \pi r_{\Pi}^{2} h_{3} M^{3}$
T-1	0,2	31,5	3,7.104		
1003	1,1	48	1,2.105		
Седая	100	194	5·10 ⁶	79	4,8.106
Д-Бой	0,42	33,5	2,8.104	12-14	(2,0-2,7)104

муфлетной полости и глубине заложения Заряда, по всей вероятности, не должно давать значительной погрешности.

1.4. О роли кинетической влергии и показателя простреливаемости грунта пои взрывах на выброс

Эффект взрыва на выброс в значительной степени зависит от свойств грунта. Однако в настоящее время нет однозначных сведений о тех конкретных его характеристиках, которые определяют объем выброса в форму воронки. Более того, очень часто при вэрывах на одной и той же площадке, где свойства грунтов, казалось бы одинаковы, наблюдается значительный разброс в объемах воронок. Совершенно очевидно, что этот разброс является следствием определенных различий местных свойств грунта, и задача состоит в том, чтобы научиться прогнозировать и количественно выражать эти различия.

Вэрыв на выброс характеризуется прежде всего воронкой. Это конечный результат его действия. Однако не менее важной характеристикой вэрыва являются кинематические параметры движения выбрасываемого грунта. В частности, кинетическая энергия движения этого грунта представляет некоторую интегральную характеристику всего процесса. И кажется естественным предположить, что если изменение некоторых свойств грунта влияет на объем выброса, то это влияние должно анапогичным образом влиять и на величину кинетической энергии. Чем больше энергия дыокения, тем больше должен быть объем выброса и, следовательно, тем больше размеры воронки. Именно это на первый взгляд очевидное допущение попытаемся проверить на основании имеющегося опыта взрывов в грунтах, при которых производилось измерение как размеров норовки, так и кинетической энергин. В основном здесь использованы результаты опытных вэрывов, провеленных в 1969 - 1971 гг. в тресте Казахвэрывпром, с заряасми массой 10 -20 кг в различных грунтах [54], в также данные работы [15].

На рис. 23 приведены объемы воронок выброса, приведенные к 44

единичному заряду, которые по- лучаются в различных грунтах при взрывании на оптимальной глубине, в зависимости от кинетической внергии выбрасываемого грунта. Оптимальной глубиной запожения заряда здесь называется такая глубина, при которой получается наибольший объем выброса [54]. Из рисунка видно, что между объемом воронки и кинетической энергией нет однозначной связи. Наиболее отчетливо этот факт проявляется при сравнении опытов в лёссе и глине: кинетические энергии отличаются в 3-4 раза, в то время как значения объемов воронок близки между собой, И второе сравнение: при варывах в солончаковом суглинке (площалка № 1) кинетическая энергия меньше, чем в глине,



Рис. 23. Зависимость приведенных объемов видимых воронок от киветической энергии выбрасываемого грунта при взрывах на различных плошадках: 1. - площадка № 1 (солончаки); 2 - площадка № 2 (супесь); 3.4 - данные по воронкам соответственно в лёссе и глине (из [15])

прямерно в 1,3 – 1,4 раза, в то время как объем воронкя в 3 раза больше. Отсутствие корреляция между кинетической энергией и объемом воронки свидетельствует о том, что имеется параметр, который более сильно, чем кинетическая энергия, влияет на эффект выброса. Таким параметром оказался показатель простреливаемости грунта K_{Π} , представляющий отношение объема камуфлетной полости V_{Π} к массе заряда 9.

На рис. 24 приведена зависимость приведенного объема видимой воронки выброса от соответствующего показателя простреливаемости грунта. Из рисунка видно, что между объемом воронки и показателем простреливаемости имеется однозначная связь, которая может быть выражена эмпирической формулой

 $V_{\rm m} = Q \ (0,15 + 1,5 K_{\rm m}),$

0047

где у – объем видимой воронки, м³; К_п – показатель простреливаемости грунта, м³/кг.

Чем больше показатель простреливаемости, тем больше объем воронки. Качественно этот вывод представляется очевидным и без опытов, поскольку объем котловой полости входит составной частью в объем воронки. Однако результат об определяющей роли показателя простреливаемости в процессе образования воронки выброса является несколько неожиданным и весьма интересным.

Наличие однозначной связи между объемом воронки и коеффициентом К_п прежде всего важно с практической точки зрения. Эта за-

(10)

Таблица 6

Взрыв	Мощность взрыва, кт	Глубина За- пожения в _З М	Объем во- ронки V,м ^З	Гадиус камуфлет- ной полос- тигп, м	$\frac{2}{3}\pi r_{\Pi}^{3} + \pi r_{\Pi}^{2} h_{3},M^{3}$
T-1	0,2	31,5	3,7.104		
1003	1,1	48	1,2.105		
Седан	100	194	5-10 ⁶	79	4,8.106
Д-Бой	0,42	33,5	2,8104	12-14	(2,0-2,7)104

муфлетной полости и глубине заложения заряда, по всей вероятности, не должно давать значительной погрешности.

1.4. О роли кинетической впертин и показателя простреливеемости грунта при взрывах на выброс

Эффект взрыва на выброс в значительной степени зависит от свойств грунта. Однако в настоящее время нет однозначных сведений о тех конкретных его характеристиках, которые определяют объем выброса и форму воронки. Более того, очень часто при вэрывах на одной и той же площалке, где свойства грунтов, казалось бы одинаковы, наблюдается значительный разброс в объемах воронок. Совершенно очевидно, что этот разброс является следствием определенных различий местных свойств грунта, и задача состоит в том, чтобы научиться прогнозировать и количественно выражать втв различия.

Варыв на выброс характеризуется прежде всего воронкой. Это конечный результат его действия. Однако не менее важной характеристикой вэрыва являются кинематические параметры движения выбрасываемого грунта. В частности, кинетическая энергия, движения этого грунта представляет некоторую интегральную характеристику всего процесса. И кажется естественным предположить, что если изменение некоторых свойств грунта влияет на объем выброса, то это влияние должно аналогичным образом влиять и на величину кинетической энергии. Чем больше энергия движения, тем больше должен быть объем выброса и, следовательно, тем больше размеры воронки. Именно это на первый взгляд очевидное допущение попытаемся проверить на основании имеющегося опыта взрывов в грунтах, при которых производилось измерение как размеров воронки, так и кинетической внергин. В основном эдесь использованы результаты опытных вэрывов, проведенных в 1969 - 1971 гг. в тресте Казахвэрывпром, с зарядахля массой 10 -20 кг в различных грунтах [54], а также данные работы [15].

На рис. 23 приведены объемы воронок выброса, приведенные к 44

еденичному заряду, которые по- пучаются в различных грунтах при взрывании на оптимальноя глубине, в зависимости от кинетической внергии выбрасываемого грунта. Оптимальной глубиной заложения заряда здесь называется такая глубина, при которой получается нанбольший объем выброса [54]. Из рисунка видно, что между объемом воронки и кинетической энергней нет однозначной связи. Наяболее отчетливо этот факт проявляется при сравнении опытов в лёссе и глине: кинетические энергии отличаются в 3-4 раза, в то время как значения объемов воронок близки между собоя. И второе сравнение: при вэрывах в солончаковом суглинке (площадка № 1) кинетическая энергия меньше, чем в глине,



Рис. 23. Зависимость приведенных объемов видимых воронок от кинетической енергии выбрасываемого грунта при взрывах на различных площадках: 1. – площадка № 1 (солончаки); 2 – площадка № 2 (супесь); 3.4 – данные по воронкам соответственно в лёссе и глине (из [15])

примерно в 1,3 – 1,4 раза, в то время как объем воронки в 3 раза больше. Отсутствие корреляции между квнетической енергней и объемом воронки свидетельствует о том, что имеется параметр, который более сильно, чем кинетическая енергия, влияет на эффект выброса. Таким параметром оказался показатель простреливаемости грунта K_{π} , представляющий отношение объема камуфлетной полости V_{π} к массе заряда 9.

На рис. 24 приведена зависимость приведенного объема видимой воронки выброса от соответствующего показателя простреливаемости грунта. Из рисунка видно, что между объемом воронки и показатепем простреливаемости имеется однозначная связь, которая может быть выражена эмпирической формулой

 $V_{\rm m} = Q \ (0,15 + 1,5 \ K_{\rm m} \),$

200

62

где у – объем видимой воронки, м³; К_п – показатель простреливаемости грунта, м³/кг.

Чем больше показатель простреливаемости, тем больше объем воронки. Качественно этот вывод представляется очевндным и без опытов, поскольку объем котповой полости входит составной частью в объем воронки. Однако результат об определяющей роли показателя простреливаемости в процессе образования воронки выброса является несколько неожиданным и весьма интересным.

Наличие однозначной связи между объемом воронки и коефициентом К_п прежде всего важно с практической точки зрения. Эта за-

(10)



Рис. 24. Зависимость приведенного объема видимой воронки от показателя прострепиваемости грунта: 1 – площадка № 1; 2 – площадка № 2; 3 – площадка № 3; 4 – лёсс и глина [15]; 5 – скальные породы [35] BRCHMOCTL OTEDBBACT BOSMONность довольно простым и вофектным способом учитывать свойства грунта при прогнозировании эффекта взрыва на выброс. Действительно, показатель простреливаемости представляет некоторую интегральную характеристику, которая учитывает как свойства грунта, так и параметры ВВ, Определение этой характеристики легко может быть произведено непосредственно на месте проведения вэрыва на выброс. Для этого достаточно пробурить скважину на глубину запожения проектируемого заряда, взорвать в Ref небольшой заряд массой 100-200 г и определить объем котла. По показателю К., с

помощью формулы (10) легко вычислить максимальный объем воронки, которая образуется при взрыве заданного заряда массой q.

Факты существования зависимости объема воронки $V_{\rm B}$ от показателя простреливаемости грунта $K_{\rm R}$, и отсутствие такой связи между $V_{\rm B}$ и кинетической внергией интересны также с точки зрения понимания механизма образования воронки выброса. Чтобы понять эти факты в совокупности, рассмотрим более детально процесс образования воронки.

На рис. 25 приведена схема, на которой показано положение поверхности купола и котловой полости в некоторый момент времени, предшествующий выбросу грунта за пределы воронки. Этот выброс, очевидно, происходит в пределах некоторого конуса, показанного на рисунке штриховкой. Положение плоскости отрыва от массива последнего споя определяется некоторым критическим условием, согласно которому кинетическая энергия дважения $E_{\rm и}$ грунта в этом слое достаточна для преодонения сил сцепления (треняя) вдоль плоскости отрыва. Очевидно, сила сцепления (треняя) пропорциональна поверхности усеченного конуса с образующей l, а работа против этой силы может быть записана в виде

$$E_{\text{orp}} = k \Pi (R_1 + R_2) t^2. \tag{11}$$

Положение плоскости отрыва последнего слоя при взрыве должно определяться следующим очевидным соотношением:

Из рис. 25 видно, что поверхность отрыва имеет коническую форму. С увеличением угла раствора конуса величина необходимой для отрыва енергии довольно быстро нарастает. На рис. 26, а приведен реальный купол для взрыва заряда массой 1 т в глине на глубине 5 м, а на рис. 26, б - зависимость работы *Е*отр от положения плос-

кости отрыва, которое зада-



Рис. 25. Схема развития выброса грунта при взрыве:

1 – поверхность купола; 2 – котловая полость

ется расстоянием вдоль поверхности *R* (кривая 2). Из етих рисунков отчетливо видев характер нарастания величины работы *E*_{отр} при увеличении угла раствора конуса, в пределах которого произойдет выброс грунта.

Кривая 1 (рис. 26, б) характеризует изменение кинетической внергии отдельных конусов между соседними сечениями. Вначале $E_{\rm x}$ возрастает несмотря на снижение скорости вдоль поверхности купона, а затем довольно резко начинает убывать.

При подсчете величины $E_{\text{отр}}$ возникает трудность с определением ковфициента k в формуле (11), характеризующего напряженное состояние грунта при отрыве. Его можно определить следующим способом. Будем считать, что объем воронки в процессе оползания бортов существенно не изменяется, и объем видимой воронки равен объему первоначальной воронки, образуемой в результате взрыва. Тогде, исходя из объема видимых воронок, которые можно определить по формуле (10) или взять из опыта, и объема котловой полости, можно определить положение плоскости отрыва. Считая далее, что вдоль этой плоскости $E_{\rm X} = E_{\rm отр}$, можно определить коэффициент k. Положение кривой 2 на рис. 26 как раз и зафиксировано на том основании, что радиус воронки вдоль первоначальной поверхности оказался равным около 8 м.

Сопоставление кривых 1 и 2 позволяет сделать вывод о влиянии кинетической энергии выбрасываемого грунта на эффект взрыва на выброс. Первое, на что необходимо обратить внимание, это различия в энаках производных этих кривых. Если кинетическая энергия вблизи плоскости отрыва убывает по мере удаления от оси воронкя, то энергия, необходимая для отрыва каждого следующего слоя в том же направлении, нарастает. Е результате втого условие для отрыва последнего слоя грунта от массива создается в довольно узкой области. Действительно, попустим, что в опыте с зарядом массой 1 т (см. рис. 26) это условие выполняется при R = 8. Тогда в спедующем сечении (R = 0) кинетическая энергия оказывается в 3,7 раза меньше энергия, необходимой для отрыва грунта по этому сечению. Условия для отрыва по нему создалутся только в том случае, если кинетическая энергия возрастет в 3 -4 раза. Следует за-



Рис.26. Сопоставление кинетической энергии (1) и энергии отрыва (2) для различных конусов при взрыве в глине заряда массой, 1 т на глубине 5 м:

а - положение конусов; б - зависимости E_K и E_{OTP} от расстояния между впидентром и конусом

метить, что объем выброса при этом увеличится только на 25-30%. Такое соотношение объемов воронок действительно имело место, например, при взрывах в лёссе к глине [15], у которых показатели простреливаемости примерно одинаковы, а кинетическая энергия отличается в 3 - 4 раза.

Приведенные выше данные позволяют также понать причины сипьного влияния показателя прострениваемости грунта на объем воронки выброса (кроме прямого влияния объема полости на объем воронки). С увеличением объема полости положение плоскости отрыва при том же запасе кинетической внергии смещается в направлении от оси воронки. В результате объем воронки возрастает не только за счет самой илоскости, но и в результате увеличения угла раствора конуса, в пределах которого происходит выброс грунта.

В заключение оценим количественно условия, которые возникают на границе отрыва при вэрыве заряда массой 1 т в глине. Будем считать, что отрыв происходит путем сдвига вдоль плоскости отрыва. Тогда

$$E_{\text{orp}} = \frac{1}{2} \pi (R_1 + R_2) l^2 r = E_K,$$

где т - касательное напряжение в плоскости отрыва.

Подставив числьнные значения геометрических размеров и величины E_к . получим r = 7.104 Па. Согласно [15], зависимость сдвигающего напряжения от нормальной нагрузки σ для рассматриваемой глины имеет вид

 $r = 1 + 0.37 \sigma (\mu \pi \sigma < 10^6 \Pi a).$

При т = 7·10⁴ Па σ = 8·10⁴ Па, Определение выбрасываемого грунта от массива происходит, очевидно, при растягивающих напряжениях в куполе.

7-1

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВА ВБЛИЗИ НАКЛОННОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.1. Краткий анализ состояния вопроса

Взрывы вблизи склонов находят широкое применение в народном козяйстве. Вэрывной метод строительства земляных сооружений обеспечил осуществление целого ряда проектов [14, 43, 44], наиболее эначительными из которых являются: строительство Кассансайской набросной плотины, сооружение плотины на Бурджар Сае, перекрытие р. Терек и др. Самые крупные взрывы проведены в последнее десятилетие на строительстве селезащитной плотины вблизи г. Алма-Аты [58] и при сооружения Байпазинского гидроузла на р. Вахш [59].

Верыв вблизи склона характерен тем, что распределение взорванной породы вохруг воронки, в отличие от взрыва на выброс, оказывается несимметричкым. Основная ее масса перемешается в одну сторону – вниз по склону.Благодаря етому свойству такие взрывы принято считать направленными, хотя с точки зрения развития самого вэрыва и передачи энергии от продуктов детонации в среду они почти не отличаются от взрывов около горизонтальной поверхности. Направленность в перемещении породы создается за счет ориентации свободной поверхности и действия силы тяжести. В практихе промышленных вэрывов, как правило, применяются групповые заряды. При этом имеет место взаимодействие отдельных взрывов, которое может быть использовано для создания более высокой степени направленности перемещения породы.

Теорая направленных вэрывов разрабатывается многими автораме. К числу наиболее ранних исследований в этой области относится работа Г.И. Покровского [43, 44]. В ней среда принимается как несжимаемая идеальная жидкость. Решение задачи о взрыве в такой среде при наличии около него свободной поверхности дает усиление движения среды в направлении втой поверхности. На основании полученного результата и были сформулированы главные положения теоряи направленного варыва. В' основном это качественная теория. поскольку в нее были запожены идеализированные представления о самом явлении и свойствах среды. Применимость ее к реальным уо--повиям ограничена, тоскольку породы обладают прочностью и сопротивляются сдвиговым деформациям, Основной вывод из втой теории состоят в том, что движение породы происходит преимущественно в сторону свободной поверхности. И если последняя наклонена, то и перемещение породы должно происходить преямущественно в направлении, перпендикулярном к склону.

Приниппиальная схема направленного действия вэрыва разработана в Сибирском отделении АН СССР [28] под руководством акад. М.А. Лаврентьева. Представляя грунт как идеальную несжимаемую жид-

2436

50

кость, в указанной работе решается задача о таком распределении в пространстве активных сип (вэрывчатки), которое обеспечивает движение некоторого объема грунта в строго заданном направлении. Действие вэрыва на каждую единицу площади представляется в виде импульса

$$l = \int P(T) dt,$$

где *Р* - давление продуктов детонации; *t*₀ - время действия продуктов детонации.

Поскольку вмпульс пропорционален толщине слоя ВВ, то распределение ВВ на поверхности жидкости, занимающей произвольный объем, находится из распределения импульса. Поступательному движению жидкости в направлении оси х со скоростью у соответствует потенциал $\varphi = vx$, который связан с вмпульсом простым соотношением

Из рассмотрения задачи вытекает, что ВВ должно быть распределено на поверхности выбрасываемого объема так, чтобы его толщина снижалась в направлении выброса по линейному закону, обращаясь в нуль на свободной поверхности. Предложенная в работе [28] схема была проверена на опыте, и результаты проверки подтвердили возможность создания с ее помощью очень высокой степени направленности броска породы при взрыве.

Исспедованию различных схем расположения зарядов с целью создания направленного действия посвящены многие работы, выполненные под руководством акад. Н.В. Мельникова и д-ра техн. наук Л.Н. Марченко [18, 32], а также в трестах Союзвэрывпром, Казахвэрывпром н в других организациях.

В процессе теоретического и экспериментального исследования направленного взрыва удалось разработать схемы, позволяющие обеспечить направленность его действия. При этом важно отметить, что эта направленность может быть достигнута при различной ориентации свободной поверхности, в том числе и горизонтальной.

К сожалению, взрыв относится к числу трудноуправляемых явлений, и чтобы осуществить хорошую направленность его действия, необходимы значительные затраты экергии. И несмотря на то, что в частоящее время имеются принципиальные схемы создания очень высокой степени направленного действия взрыва, практическое их применение в больших масштабах тормозится техническими трудностями При проектировании промышлени экономическими соображениями. ных вэрывов, особенно крупных, предпочтение все еще отдается относительно простым, хотя и не всегда наиболее эффективным схемам расположения зарядов, в которых управление достигается в основном энергии. Наиболее распространенны-За счет природных источников ми являются взрывы вблизи наклонной свободной поверхности, когда направленность перемещения породы достигается главным образом за Счет влияния поля силы тяжести.

В настоящее время при расчете взрывов у наклонной свободной поверхности используется по существу формула Борескова, связывающая размеры воронки, массу заряда и л.н.с. Вместе с тем для взрыва у склона важны в первую очередь параметры навала, для которых сушествующая методика расчета прямых определений не дает. В результате расчеты взрывов у склона носят весьма приближенный характер. Их неудовлетворительность особенно стала ощутимой при переходе к крупным взрывам, когда неточности в расчетах оборачиваются огромными объемами дополнительных работ, значительно снижающих результативность в целом взрывных методов строительства.

Наиболее водективный путь совершенствования методов расчета ворывов у склонов представляется в подробном исследовании прежде всего самих крупных промышленных взрывов, которое важно с различных точек зрения. Во-первых, необходимо инструментально регистрировать процесс развития подобных взрывов с тем, чтобы получать нанболее полную информацию. Во-вторых, поскопьку методика расчета крупных промышленных взрывов в настоящее время спабо разработана. то каждый такой взрыв является в экспериментальным взрывом, на котором проверяется правильность произведенных расчетов его действия. Пон этом весьма важно установить степень соответствия фак-ТИЧЕСКИХ результатов взрыва с намечавшимися в проекте не только по конечным параметрам, во и по технологии проведения взрыва. И, наконец, исследование промышленных взрывов важно и с научной точки зрения. Наблюдения за ними позволяют выявлять действительно важные стороны явления и, таким образом, оценивать правильность выбора тех или нных определяющих параметров, которые закладываются в теоретические схемы или изучаются в модельных эксперимен-Tax.

Результаты крупных промышленных вэрывов эначительно активизировали исследования вэрывов вблизи наклонной свободной поверхности. После них была проведена большая серия опытных вэрывов зарядов массой от 5 до 100 т. В сочетания с данными по промышлейным вэрывам, а также с результатами ранее проведенных исследоваиий опытные вэрывы позволили выявить основные физические особенности развития этого вида подземного вэрыва. И хотя пока еще исполял сказать, что создана окончательная теория вэрыва около наклонной свободной поверхности, тем не менее полученные результаты позволяют улучшить существующие методы расчета подобных вэрывов.

2.2. Исспедорание восывов при строительстве селезащитной плотивы в Мелео

Строительство селезащитной плотины на р. Малой Алмаатичке (в Медео) имело ряд особенностей, наиболее характерной из которых является срок возведения этого сооружения. Плотину необходимо быпо создать за время между двумя селеопасными периодами, т.е. примерно за 6 – 7 мес. В противном случае недостроенная плотина могла усугубить разрушительное действие возможного селевого потока, добавив в него свою массу породы. С помощью обычных методов строительства создание пиотины высотой около 100 м и объемом более З млн.м³ в течение указанного срока было практически невозможно. Единственно приемпемым вариантом строительства как раз и было создание плотины с помощью крупных взрывов.

2.2.1. Общая характеристика взрывов

Проектом предусматривалось проведение двустороннего взрыва. Основной объем породы в тело илотнны предполагалось уложить в результате взрыва правого склона, а доработка плотины до проектных отметок – за счет взрыва левого склона. Для обеспечения большей направленности действия взрыва расположение зарядов было принято двухрядным (рис. 27). Пунктирной линией показана граница навала от первого взрыва, сплошной линией – от второго взрыва. Основные параметры зарядов приведены в табл. 7.



Рис. 27. Слема расположения зарядов при взрывах в Медео и план местности: 1-5 - заряды при правобережном взрыве; 1-10 - заряды при левобережном взрыве

Таблица 7

Показатели	Номер заряда									
	1 (основ- ной)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Прав	обереж	ный	вэрыв		1				
Масса заря- да, т	3604	439	480	275	495					
Л.в.с.,м	85	48	53	48	58					
	Лево	береж	ныя 1	варыв				}		
Масса заря- да, т	175	371	205	208	162	440	445	745	845	350
Л.н.с., м	36	46	40,	38	33.5	si - '	-	-	-	-

Линия наименьшего сопротивления для зарядов первого ряда направлена в сторону склона горы, а для основного заряда — в сторону плоскости обнажения, которая должна образоваться за счет воронки выброса от вэрыва первого ряда зарядов.

В результате правобережного взрыва образовалась плотина, вид которой показан на рис. 28. Общий объем породы, уложенной в тело плотины, составляет примерно 1,5 млн. м³. Минимальная высота равна 60 м, ширина плотины по основанию – около 560 м. Распределение породы после взрыва получилось несколько неожиданным. Наибольшее коничество породы было переброшено к левому берегу, в то время как по проекту предполагалось, что основной объем останется у правого берега. Следует подчеркнуть, что несовпадение ожидаемых и фактических результатов взрыва не связано с какими-либо случайными погрешностями при проектировании, а отражает реально существующую точность, которую в состоянии обеспечить имеющиеся сейчас методы расчета крупных вэрывов.

Певобережный вэрыв также проводился в два этапа, Фактическая последовательность вэрывания зарядов при нем значительно отличалась от проектной. Все пять зарядов первого ряда взорвались одновремению, хотя по проекту заряды № 1 и 5 должны были взрываться с замедлением. Кроме того, три заряда второго ряда (№ 6, 7 и 8) также взорвались одновременно с зарядами цервого ряда, что повидимому, объясняется неточностями в расчете с боек. По проекту же предполагалось, что все пять зарядов второго реда будут взорваны через 2 с. Проектный интервал замедления оказался выдержанным только для зарядов № 9 и 10. В результате указанных отклонений сбщая масса зарядов первого взрыва составила 2746 т, а второго 1195 т. Объем навала от левобережного взрыва составил примерно 1,4 млн. м³. За счет этого взрыва высота плотины увеличи-





лась от 10 до 30 м. На ее гребне в районе минимальной отметки увеличение составило 15 м.

Окончательная высота плотины в самой низкой части равна 75 м, средняя по сечению вдоль оси – 84 м. Общий объем породы в теле плотины после двух взрывов равен примерно 3 млн.м³, ширина по основанию – более 500 м, по гребню – около 100 м.

Наиболее существенное отклонение от ожидаемых величии наблюдается для высоты плотины: фектическое эначение ее оказалось примерно на 20 м меньше проектной. Причина этого состоит в недостаточной точности определения как объема обрушения, так и характера распределения воорванной породы.

Практически одновременно с началом движения свободной поверхности склона наблюдается выход газообразных продуктов через штольни. Выход газов начался одновременно из всех трех штолен, и уже через 1,5 с перед их устьями образовалось огромное облако газообразных продуктов взрыва. Ориентировочная оценка показывает, что объем газов, вышедших через штольни в первые 2 с, составляет око.

В результате взрыва первого ряда зарядов на поверхности склона сформировался купол поднимающейся породы. Четко выраженные очертання его сохранялись в течение первых двух-трех секунд. После втого на поверхность склона выходят сквозные трещины, через которые происходит прорыв газообразных продуктов. Купол при этом разочшвется и превращается в массу раздробленной породы. Характерной особенностью развития купола на заключительных сталиях являет. ся слабая интенсивность струй газообразных продуктов взрыва, прорывающихся по трещинам. По существу на поверхности примерно через З с после варыва образуется два явных очага прорыва газов. Объем газов, прорвавшихся в район этих очагов, очень незначителен по сравнению с объемом газов, вышедших через штольни. Этот факт представляется очень интересным. Он означает, что основная масса газробразных продуктов взрыва была выброшена на начальных сталиях развития купола через штольни, в то время как все поспедующее движение породы происходино за счет энергия, переданной среде в самом начале расширения продуктов.

На рис. 29 схематично дан разрез склона горы через центральную штольню в различные моменты времени. Максимальная скорость движения породы на начальной сталии подъема (до прорыва купола газами) составляет примерно 40±10 м/с.

Значительного улучшения в расшифровке материалов киносьемки удалось достигнуть благодаря применению стереосьемки. По стереопарам были установлены основные моменты развития вэрыва. В частности, была определена дальность разлета породы по различным направлениям после вэрыва зарядов первого ряда. Вверх по ущелью максимальная дальность разлета составляла 150 – 200 м, вниз по ущелью 110 – 130 м. Перпендикулярно к ущелью максимальная дальность равнялась примерно 150 м.

Сравним теперь картину развала пороцы после нервого вэрыва, полученную по стереофотографиям промежуточных стадий его развития, с фактически наблюдаемыми окончательными контурами навала. Расстояние от оси центральной штольни до границы зоны основного развала породы вверх по длине реки (см. рис. 27 - 28) равно примерно 200 м, вниз по долине – около 360 м. Таким образом, картина распределения породы явно несимметрична. Если вверх по ущелью и поперек ущелья дальность разлета согласуется с данными по первому вэрыву, то в сторону катка Медео разлет оказался значительно сильнее.

Существенный интерес представляет распредслание взорванной массы по отношению к оси плотины, проходящей влоль дентральной штольни. Объем навала породы вниз от оси плотины равен 0,73 · 10⁶ м³, а вверх по ущелью – 0,77 · 10⁶ м³. Несмотря на явную несимметрию профиля плотины по отношению к ее оси (см. рис. 28), взорванная порода распределилась практически поровну между указанными частями плотины.

Стереофотографии позволяют определить объем породы, оторван-56



Рис. 29. Очертание свободной поверхности в различные моменты времени при правобережном взрыве:

А - развитие дупола; Б - оползание склона; В - орнентировочное по- и ложение полоскостей отрыва породы от массива

ной от массива горы в результате первого вэрыва. На рис. 29 пунктирной линией показано положение плоскости отрыва породы. Объем породы, оторванной взрывом зарядов первого ряда, равен около 1 млн. м³ в плотном теле. С учетом разрыхления этот объем составляет 1,2 .-1,3 млн.м³. Принимая во внимание общий объем илотины, равный примерно 1,5 млн.м³, можно заключить, что основная масса породы в тело плотины уложена в результате взрыва зарядов первого ряда.

Взрыв основного заряда произошел через 3,6 с после первого взрыва. Начальная скорость движения свободной поверхности склона горы в районе выхода л.н.с. основного заряда равна 20 м/с. Определенный интерес представляет направление прорыва газов основного заряда в атмосферу. Примерно через 7 с после первого взрыва из газопылевого облака вняз по ущелью прорываются новые газовые струн, связанные с взрывом основного заряда. Вслед за появлением этих струй наблюдается прорыв газов перпендикулярно к ущелью примерно под углом 45° к горизонту. В противололожную сторону, вверх по ущелью, прорыва газов из камеры основного заряда вообще не видно.

Наблюдаемый прорыв газов основного взрыва происходил по тому ваправлению, в котором порода оказалась наиболее сильно разрушенной. Последнее, очевидно,было предопределено расположением зарядов первого ряда. Из рис. 27 и табл. 7 видно, что массы зарядов № З и 4. расположенных симметрично относительно центральной

штольни, существенно различны. Это привело, очевидно, к тому, что зоны дробления около этих зарядов были также различными. Заряд № 3, имевший почти влвое большую массу, при взрыве раздробил породу в направление основного заряда на большую глубину по сравнению с зарядом № 4. Это обстоятельство, по всей вероятности, и определило ваправление прорыва газов из полости основного взрыва в сторону заряда № 3, т.е. вниз по ущелью.

Как уже говорилось выше, основная масса породы в тело плотины уложена за счет первого взрыва. Роль второго взрыва свелась по существу и тому, что он засыпал воронку от первого взрыва. Добавка в тело плотины от основного взрыва составляет, по-видимому, не более ЗОО - 400 тыс. м³ породы. Как же объяснить наблюдаемое распределение породы в теле плотины, учитывая приведенные выше данные о действии первого и второго взрывов?

Главной особенностью плотины является явная несимметрия ее формы по отношению к осн. Вместе с тем основная масса плотины образована первым взрывом, при котором порода не была распределена с такой особенностью. Дальность броска породы викз по ущелью при первом взрыве, как следует из призеденных выше данных, была даже несколько меньше, чем в противоположную сторону. Из всех этих данных вытекает, что несимметрия формы окончательной плотины могла возникнуть только в результате действия основного второго взрыва.

Совершенно очевидно, что за счет двяжения породы, брошенной непосредственно основным вэрывом, не могла возникнуть наблюдаемая картина ее распределения из-за малости сообщенных этим взрывом скоростей движения. Наиболее вероятной причиной, которая может объяснить несимметрию профиля плотины вдоль русла реки, является действие газообразных продуктов взрыва основного заряда. Продукты взрыва этого заряда, прорвавшиеся по нанболее слабому участку массива в сторону заряда № З, встретили на своем пути породу, раздробленную первым взрывом, которая в этот момент времени еще находилась в состоянии полета, причем скорость ее движения была невелика (не более 20 - 30 м/с), Скорость истечения газов H3 KOTловой полости основного взрыва на начальных стадиях была более 100 м/с. Учитывая огромную массу вытехающего газа, по порядку величны равную массе основного заряда, и значительную скорость его движения, нетрудно представить последствия встречн такого потока с медленно летящей раздробленной породой. Значительная разбросанность породы вина по оси плотины объясняется, очевидно, действнем продуктов взрыва основного заряда. Если бы этого разбрасывания не было, то плотина получилась бы более компактной. В частности, ширина ее вдоль ущелья по основанию равнялась бы 300-350 м при соответствующем увеличении высоты.

При первоначальном просмотре кинокадров из-за мощной струи газов после основного взрыва создается впечатление, что его заряд был недостаточно заглублен. Однако это впечатление обманчиво, о чем свидетельствует практически полное отсутствие воздушной ударной волны при взрыве. В случае малых заглублений зарядов такая волна всегда образуется. В действительности заглубление основного

36

заряда следует считать слишком большим. По существу при этом взрыве не произошло настоящего отрыва породы и ее броска. Весь склон в эпицентральной зоне выше плоскости отрыва, созданной первым взрывом, испытал очень незначительное поднятие. Основное движеине указанной части склона – это интенсивное оползание вниз, которое началось через 7 с после взрыва, т.е. после выхода продуктов взрыва из котловой полости (см. рис. 29).

В пелом по основному заряду спедует заключить, что его распопожение было не оптимальным. Ориентировочная опенка показывает, что приближение заряда к поверхности склона могло бы обеспечить увеличение объема породы, уложенной его взрывом в тело плотины. Наиболее оптимальным варнантом, очевидно, явилось бы расположение основного заряда не на одном уровне с зарядами первого ряда, а выше их. Такое расположение позволнию бы более эффективно использовать взрыв основного заряда благодаря уменьшению расстояния до свободной поверхности. Кроме того, при этом не произошло бы разбрасывання породы, раздробленной первым взрывом, что могло дать дополнительное увеличение высоты и улучшение профиля плотивы.

2,2,3. Результаты певобережного вэрыва

На сейсмограммах, полученных при левобережном взрыве, отчетляво видны две серин колебаний, разделенных между собой интервалом времени в 2 с. Общая масса зарядов первого ряда равна 1116 т, а второго ряда – 2825 т. В соответствии с этими массами зарядов и вамечавшимся порядком взрывания следовало ожидать, что амилитуда сейсмических воли от первого взрыва. будет примерно в 1,3 – 1,5 раза меньше соответствующих амплитуд при втором вэрыве. В действительности получилось обратное соотношение: амплитуда в первой серии колебаний в среднем больше в 1,5 раза, чем во второй серии колебаний.

Анализ результатов киносъемки показал, что три заряда второго ряда (№ 6, 7 и 8), суммарная масса которых равна 1630 т, взорвались одновременно с зарядами первого ряда. В резулитате этого общая масса зарядов, взорванных в первую очередь, оказалась равной 2746 т. С интервалом в 2 с произошел взрыв зарядов 9 и 10 суммарной массой 1195 т. Такое изменение порядка взрывания, связанное, очевидно, с плохям качеством забойки штолен между первым и вторым рядами зарядов, привело к существенным изменениям результатов действия взрыва, намечавшихся в проекте.

В результате певобережного взрыва: от массива склона горы оторвано примерно 1,2 млн. м³ породы, считая в плотном теле. Взорванная масса распределилась на довольно значительной площади практически по всей поверхности плотины, созданной правобережным азрывом (см. рис. 28). Из поперечного разреза плотины, проведенного примерно через середину русла реки, видно, что высота навала породы после левобережного взрыва получилась неодикаковой. Наибольшее увеличение высоты плотины паблюдается на ее нижнем откосе. где она в некоторых точках достигает 25 - 30 м. В сечения по (гребню) плотины высота навала также переменна. В самой низ-0CH кой части ппотины. где необходимо было как раз создать максимальнию досьшку, ее высота после левобережного вэрыва увеличилась примерно на 15 м. Подсчет показал, что по отношенню к оси плотины объем навала породы распределился сравнительно равномерно. Вверх по долине реки втот объем равен 695 тыс. м³, винз - 751 тыс. м³ Разницу в объеме на 10% следует считать незначительной, так как такого же порядка и общая точность определения объема навала. Весь объем навала породы составил 1,45 млн. м3. Несмотря на понмерно равномерное распределение взорванной массы по отношению к оси плотины, степень разбросавности породы по обенм сторонам неодика поперечного разреза плотинакова. Это особенно наглядно ведно ны (см. рис. 28, б).

Возникает вопрос, с чем же связана столь значительная разбросанность породы при левобережном взрыве, и почему направленность его действия так сильно отличается от намечавшейся в проекте? Освовной причиной, очевидно, является нарушение порядка взрывания. Тот факт, что больше половикы зарядов второго ряда взорвалось вместе с зарядами первого ряда, привел к ряду нежелательных последствий. Во-первых, основной эффект направленного действия предполагалось создать за счет дугообразного расположения зарядов второго ряда. При их одновременном взрывании должна была возникнуть кумулятивная направленность в результате схождения потоков породы вблизи осевой ликии плотины. Однако поскольку заряды второго ряда взорвались разновременно, то не получилось к направленности.

Заметим, что вопрос о возможности создания дополнительной нашравленности перемещения породы за счет разновременного вэрьвания зарядов будет более подробно обсуждаться ниже. Здесь же лишь отметим, что эти возможности при взрывах в скальных породах весьма ограничены, поэтому слабая выраженность направленности перемещения породы при обсуждаемом взрыве теперь не кажется столь неожиданной, как это было сразу после взрыва.

2.2.4. Обсуждение результатов

Результаты наблюдений вэрывов в Медео можно разделить на три группы. К первой группе относятся результаты, касающиеся непосредственно самых вэрывов. Это прежде всего данные о их фактическом развитии. С помощью инструментальных наблюдений зарегистрированы основные параметры, характеризующие вэрывы, включая изменение кинематических параметров движения склона и степень их соответствыя конечному распределению взорванной породы, регистрацию выхода продуктов детонации по штольням и трещинам, определение последовательности взрывания отдельных зарядов, выяснение основных особенностей образования плотины и роль отдельных взрывов в этом процессе.

Вторая группа результатов касается вопросов использования опы-

2436

60

Sec. G. Start

та Мадео пля проектирования и проведения будущих аналогичных взрывов. В ней следует выделить наиболее общий результат о возможности создания с помощью вэрывов больших завальных плотин. Несмотря на некоторые отклонения от проекта, созданная плотина решила основную задачу защиты г. Алма-Аты от селевых потоков. Большое значение имеет также результат, касающийся вопросов организации и проведения крупных взрывов и прежде всего вопросов их безонасности. Опыт Медео показал, что такие взрывы можно проводить не только в малонаселенных районах, но и вблизи крупных городов. Наконец, в Медео получены рекомендации по уточненно таких важных параметров вэрыва, как масса заряда в зависимости от л.н.с., порядок расположения зарядов и штолен, интервал замедления и другие, которые были учтены, в частности, при Байпазинском взрыве и могут использоваться при других аналогичных вэрывах.

Найбольший интерес с научной точки эрения представляют результаты, которые способствуют пониманию самого явления вэрыва и формулировке конкретных задач исследований, направленных в конечном счете на дальнейшую разработку и совершенствование методов промышленного использования крупных вэрывов. Эти результаты объединены в третью группу. Важное место в ней занимает результат, касающейся методов расчета вэрывов вблизи склонов. Основной вопрос заключается в том, на каком принципе строить методику расчета крупных вэрывов вблизи наклонной свободной поверхности. Можно, например, илти по пути построения эмпирических формул, связывающих непосредственно конечные результаты взрыва с его начальными параметрами. Однако это очень длительный и дорогой путь, требующий проведения большого числа крупных взрывов. Только после обобщения результатов етих вэрывов можно рассчитывать на создание надежных формул.

Изучение взрывов в Медео показывает возможность иного полхода, Поскольку распределение породы определяется кинематическами параметрами ее движения на начальных стадиях ворыва, а эти параметры, в свою очередь, зевисят от массы заряда и п.н.с., то можно построить методику расчета, основанную на существовании зависимости между указанными группами параметров. Это тоже эмперический подкод, но по сравнению с указанным выше в нем используется больше информации о каждом взрыве и за счет втого повышается эффективность использования опыта проводимых крупных взрывов. Исходя из предлагаемого метода, вытекают сразу две конкретные задачи исспедований: 1) установление связи между кинематическими параметрами (скорость движения, направление и др.) и начальными параметра-МЕ вэрыва (масса заряда, п.н.с., свойства породы и т.п.); 2) установление зависимости распределения взорванной породы от кинематических параметров. Важно отметить, что эти задачи можно решать с помощью сравнительно небольших взрывов, используя методы модеперования.

После взрывов в Медео возникла также зедача о роли продуктов детонации, причем выявились два аспекта этой задачи. Поскольку значительная часть продуктов взрыва выходит по штольне на начальных стаднях развития выброса, встает вопрос о возможном снижении за счет втого эффективности работы взрыва в целом. Если исключить преждевременный выход газов, например, бетонированием штопьни, то можно ожидать увеличения эффекта выброса. Второй аспект состоит в том, что продукты детонации при своем истечении из полости способвы выносить и разбрасывать значительное количество породы. Особенно это существенно при многорядном расположении зарядов, когда газы при своем истечении встречают породу, раздробленную предыдуцими взрывами. Эта способность продуктов детонации, как показывает опыт Медео, может существенно изменить эффект вэрьва. Поэтому его также необходимо изучать. К задаче о роля продуктов детонации примыжает также задача расположения зарядов при массовых взрывах и порядке их вэрывания. Если бы, например, при правобережном вэрыве в Медео основной заряд был расположен выше зарядов первого ряда. и его продукты не встретились с породой, брошенной первым вэрывом, то сильного разбрасывания породы в сторону нижного быефа плотины могло не произойтя.

Интервалы замедлення также важны, поскольку от них зависит не только характер истечения продуктов и их взаимодействие с раздробленной породой, но и эффект направленности действия взрыва в целом. На рис. ЗО приведены две схемы образования плоскости обнажения. При малых интервалах не успевает сформироваться новая плоскость облажения (а), которая могла бы направить действие зарядов второго ряда. Такая плоскость может образоваться лишь в течение определенного отрезка времени, величина которого зависит от масштаба взрыва (б). Поэтому и интервалы замедления необходимо выбирать, исходя из конкретных условий взрыва. В Медео интервалы составляли 2 - 4 с. Примерно такие интервалы примевялись при взрывах зарядов массой в десятки тони, и перенесение их без изменений на заряды в тысник тони вряд ли оправдано.

Одним из серьезных вопросов, которые приходилось решать при про-



Рис. 30. Схема образования искусственной плоскости обнажения при малых (а) и больших (б) интервалах замедления, которая направляет действие взрыва заряда № 2 62 ектирование взрывов в Медео, была сейсмическая безопасность. Противники взрывов, а их было много, пророчние такое землетрясение от взрыва, которов могло разрушить г. Алма-Ату. Опыт показал ошибочность етих пророчеств.

2.3. Байпазинский варыв

Байназинский вэрыв был проведен 29 марта 1968 г. в целях создання водонапорной набросной плотины на р. Вахш. По условням проведения он имеет ряд особенностей, которые отличают его от вэрывов в Медео. Главной из них является тот факт, что вэрыв в Байлазах проводился около довольно крутого склона. Правый берег р. Вахш, сложенный известияхами, возвышается над уровнем воды на 300 – 350 м и обрывается к реке под углом 60 – 70°. Эти два обстоятельства (высокий берег и крутой откос) ставят задачу об устойчивости склона после вэрыва.

Важной особенностью Байпазинского вэрыва является также то, что он использовался для создания водонапорной плотины. Это привело к необходямости его проведения вблизи важных элементов гидроузла, таких как водопропускной тоннель Вахш – Яван дликой 7,5 км и диаметром более 5 м, подводящий канал, быстроток и другие гидросооружения, где ожидалось сильное землетрясение.

Ворыв в Байпазах явился важным промышленным експериментом,



Рис. 31. Схема расположения зарядов в элементов гидроузла при Байназинском вэрыве

а результата которого была создана водоналорная плотина высотой 50 м. Фильтредия воды через нее оказалась ничтожной, и в течение первых двух дней уровень воды перед плотиной поднялся на несколько десятков метров. Воздействие вэрыва на элементы гидроузла не превысило допустимых величин и не причинило ему существенных повреждений.

Вэрывной метод создания плотным позволил сократить сроки стронтельства Байназинского гидроузла и дать воду на орошение земель Яванской долины на два года раньше того срока, который мог быть обеспечен другими возможными методами. За счет економии средств на строительстве и более раннего ввода гидроузла в строй получена экономия на сумму более 150 млн. руб. [5].

2.3.1. Общая характеристика вэрыва

Схема расположения зарядов при Байпазинском взрыве приведена на рис. 31, а их основные характеристики даны в табл. 8. Взрывчатое вещество располагалось в серин камер. Для снижения сейсмического эффекта и повышения степени направленности действия взрыва заряды в камерах вэрывались неодновременно, Вэрывы зарядов № 1 - 7, 11 и 12 сопровождались интенсивным выходом продуктов вэрыва из подводящих штолен. Одновременно с выходом газов наблюдается поднятие склова горы в виде купола, вершина которого располагается в районе выходов п.н.с. зарядов № 11 и 12 на свободную поверхность. Наличие единого купола при указанных вэрывах объясниется малым значением интервалов замедления при взрывах № 1, 2 и 3 (табл. 8) Выброс газов от взрывов основных зарядов (№ 11 н 12) происходил по штольням. Это означает, что к моменту втих взрывов массив породы еще не был сколько-нибудь значительно разрушен более ранним вэрывом зарядов первого ряда. Благодаря этому наблюдается очень хорошее куполообразное движение породы практически без последующего его нарушения прорывами газов по трешинам.

Варыв заряда № 8 также сопровождался интенсивным выходом газов через штольню. При вэрыве заряда № 9 такого выхода не наблюдалось, а при вэрыве зарядов № 10, 10а выброс газов сопровождался заметным разбрасыванием раздробленной породы. Последнее произошло благодаря тому, что штольня, ведущая к зарядам №10 и 10а, к моменту вх подрыва была разрушена предыдущими вэрывами.

За счет выхода газов при взрывах наблюдались воздушные ударные волны заметной интенсивности, максимальное давление на расстоянии 600 м соотавляло 0.02 - 0.03 кгс/см²,

После образования куполов и обрушения их вниз началось интенсивное оползание частей склона горы, расположенных выше воронок выброса. Оползание достигло верхней части склона. Толщина сползшего споя колеблется от 10 до 30 м. Процесс оползания, по всей вероятности, был в какой-то степени облегчен структурой взрываемого массива, который сложен слоями известняков толщиной 5 - 10 м, распопоженнымя параллельно склону.

2436

Таблица 8

Номер за- ряда	Интервал замед- пения, с	Номер вэрыва	Масса заряда, т	Л.н.с., м	
1	0	1	5,4	19,0	
2	0	1	8,6	17.5	
3	0	1	25,0	24.0	
4	0	1	57,9	34,0	
5	0	1	62,7	33,5	
6	0	1	61,7	35,0	
7	0	1	31,4	30,0	
8	1,5	4	289,0	52,0	
9	4,0	5	62,8	32,5	
10	5,5	6	94,9	32.0	
10a	5,5	6	9,7	23,5	
11	0,25	2	542,0	60.0	
12	0,58	з	642,0	60,0	
Плосхий	4,0	5	90	-	

В результате вэрыва образовалась плотина (рис. 32). Распределение взорванной породы после вэрыва оказалось близким к проектному. Минимальная отметка плотины находится на месте ее премыкания к левому берегу. Высота плотины в этом месте равна 50 м. В целом чавал породы отчетливо разделяется на две части. Порода, уложенная за счет взрыва, сравнительно мелко и равномерно раздроблена. Максимальные размеры кусков не превылают нескольких десятков сантиметров. Вторая часть навала образована за счет обрушения склона и находится над первой.

Она характеризуется неравномерным дроблением с преобладанием крупных кусков. Размеры отдельных кусков в этой части навала достигают в поперечнике 5 м и более. В значительной степени размеры этих кусков оказались заданными естественной споистостью породы, так как отрыв ее от основного массива при оползании происходил по естественным границам раздела между отдельными слояма.

Вэрыв оказался совершенно безопасным для элементов гидроузла как по действию сейсмических волн, так и по разлету камней. Водопропускной тоннель под действием волны сжатия не получил серьезвых повреждений, хотя максимальная скорость в волне сжатия около него составляла примерно 100 см/с. От сейсмического толчка и разпета камней не получил также существенных повреждений и комплекс

9-1



Рас. 32. Плотина и склон горы в Байвазе

сооружений гидроузла напротив взрыва, находившихся на расстоянии менее 200 м. В подводящем канале и быстростоке гидроузла оказалось всего несколько штук небольших камней, не причинивших этим сооружениям никакого вреда.

2.3.2. Движение поверхности склона

Контуры купола в различные моменты времени, образовавшегося при взрыве основных зарядов №11 и 12, приведены на рис. 33. Аналогичные купола имели место и при других взрывах. Графики движения вершин куполов показывают, что максимальная скорость наблюдается на начальных стадиях движения. Ниже приведены значения втих скоростей (м/с) для отдельных куполов.

Точность измерения схоростей составляет 5 м/с. Газовое ускорение при Байлазинском взрыве, по всей вероятности, отсутствовало, что может быть связано с быстрым выходом газов из штолен

2.3.3. Механизм образования плотины

При обсуждении механизма образования плотины рассмотрим два вопроса: соотношение между объемами породы в теле плотины, бро-68



Рис. 33. Очертания купола и газовой струй при вэрыве основных зарядов № 11 и 12 и зарядов № 4, 5, 6 и 7: 1 - 0,8 c; 2 - 1,6 c; 3 - 2,3 c; 4 - 3 c; 5 - 4,2 c; 6 - 5 c; 7 - 5,8 c.

шенной вэрывом и сползшей со склона под действием силы тяжести после взрыва, рояз начальных скоростей полета при определении максимальной дальности перемещения породы.

Объем породы, оторванной от массива непосредственно в результате вэрыва, может быть определен по размерам куполов взорванной породы. Они сохраннот свою форму в течение длительного времени, и по ним надежно может быть определена верхняя граница оторванной породы. Как показал анализ кинохадров, верхняя граница обрушения склона оказалась намного выше границы оторванной породы.

В табл. 9 приведены радвусы воронок для различных зарядов, определенных по очертаниям куполов. Средний относительный радвус воронки составляет примерно 8 м/т^{1/3}. Подсчет объемов взорванной породы в пределах воронок указанных размеров дает величну около 1 млн. м³. Это тот объем породы, который был раздроблен взрывом в пределах массива ниже границ оторванной породы. Порода, которая расположена выше етой границы, непосредственно не была сброшена взрывом. Ее перемещение вниз могло произойти только за счет оползания после взрыва. Объем етой породы также примерно равен 1 млн. м³. Таким образом, объем взорванной взрывом породы и обрушенной под действием силы тяжести уже фактически после взрыва оказались примерно одинаковыми.

Анализ движения породы при взрыве приведем на примере основного купола (см. рис. 33).

Вначале купол имеет довольно ровную поверхность. Вершина его постепенно поднимается перпендикупарно к склону, а диаметр сохраняется постоянным. Однако примерно через 2 - 2,5 с верхняя грани-

9-2

Таблица 9

Показателя	Номер заряда						
	12	11	8	9	10		
Масса заряда, т	642	542	289	63	65		
Радиус воронки, м	69	65	62	25	36		
Приведенный раднус во- ронки, м/т1/3	8	8	9,4	6,3	9		

ца купопа начинает опускаться, и последующие контуры вблизи этой гранным пересекают предыдушие, При просмотре кинолент особенно отчетливо наблюдается проседание верхней части купола вниз. При этом вершина купола еще продолжает смещаться в направлении от склона горы, постепенно опускаясь вниз. На рис. 33 приведена траектория движения вершины купола, которая построена расчетным путем в предположении, что движение происходит под действием только силы тяжести и начального запаса кинетической энергии, Наряду с расчетной траекторией на этом же рисунке приведена также фактическая траектория (начальный участок), которую удалось построить благодаря наличию на поверхности склона характерной точки, видимой на кадрах. Сравнение показывает, что расчетная и фактичес-Пачальных кая траектории удовлетворительно совладают между собой. Из траекторий видно, что даже куски с максимальной скоростью 25 м/с не долетают до противоположного берега реки.

Высота купола по отношению к поверхности склона растет в течение первых 2,5 - 3,0, с, после чего остается почти без изменений. После достижения максимальных размеров купол начинает смещаться вдоль склона вниз в виде вала постоянной высоты. Движение взорванной породы при втом напоминает лавину, катящуюся вниз по склону. По-видимому, именно за счет этого лавинообразного движения произошло заполнение створа плотины, хотя начальных скоростей движевия было недостаточно для броска породы на левый край примыкания плотины к берегу.

2.3.4. Обсуждение результатов взрыва

Первая особенность Байпазинского вэрыва, которая выгодно отличает его от вэрывов в Медео, заключается в отсутствии разбрасывания породы. Причные етого, по всей вероятности, заключается в следующем. При вэрывах в Медео заряды располагались в два ряда, и вэрыв второго ряда производился с интервалом замедления в несколько сехунд. Это привело к тому, что продукты вэрыва зарядов второго ряда прорывались в атмосферу через породу, раздробленную вэрывами зарядов первого ряда. Однако поскольку масса этих продуктов была значительна, а скорость истечения постигала 100 м/с, то они ин-68
тенсквно вовлекали в движение породу в бросали ее на значительные расстояния. Часть зарядов в Байназах была также расположена в два ряда, хотя заряды второго ряда были значительно больше зарядов первого ряда. К тому же интервал замедления был намного меньше, чем в Медео. Заряды № 11 и 12 были взорваны по отношению к зарядам первого ряда соответственно через 0,25 к 0,58 с. В результате к моменту взрыва зарядов второго ряда в Байназах массив породы не испытал существенных разрушений. Прорыв газов из полостей второго ряда происходил по штольням, которые к этому времени фактически не были обрушены.Поэтому продукты взрыва вышли через штольни и не смогли вовлечь в движение заметных объемов горной породы.

Результаты Байлазинского вэрыва, вслед за вэрывами в Медео, показывают важность задачи о роли продуктов взрыва и необходимость ее исследования. Они позволили сделать некоторые предварительные рекомендации.

1. При проведении промышленных взрывов, вследствие слабой забойки, наблюдается выход продуктов детовании по подводящим штольням, что может снижать эффективность использования энергии взрыва. Этого можно избежать путем устройства более прочной забойки. Кроме того, при определенном расположении зарядов и порядке взрывания выход газов из полости сопровождается значительным разбрасыванием породы. Поэтому при проектировании промышленных вэрывов следует учитывать и эти факторы отрицательного действия продуктов детонации.

2. При двухрядном расположении зарядов на одном уровне в целях уменьшения разбрасывания породы интервал замедления между взрывами первого и второго рядов должен быть минимальным. Допустимым можно считать интервалы не более 0,3 - 0,5 с, при етом, естественно, первый взрыв не успеет создать нужную плоскость обнажения для направления действия второго вэрыва, и замедление 8 этом спучае может играть положительную роль в основном с точки зрения снижения сейсмического эффекта. При интервале замедления бопее 1 с неизбежно интенсивное разбрасывание породы продуктами взрыва зарядов второго ряда. В целях уменьшения разбрасывающей роли продуктов взрыва предпочтительное однорядное взрывание. При двухрядном расположении делесообразно второй ряд зарядов распопагать выше первого с тем, чтобы при первом вэрыве не происходипо разрушение подводящих штолен. Можно также подводящие штольян к зарядам второго ряда проходить с противоположной стороны, если К ЭТОМУ ИМЕЮТСЯ ВОЗМОЖНОСТИ.

Интересной особенностью взрыва в Байпазах является сравнительно низкий коэффициент расхода ВВ на 1 м³ взорванной породы. Помимо породы, сброшенной взрывом, произошло обрушение породы со склона горы над воронками выброса, в результате чего общий объем плотины превышает 1,5 млн.м³. Примерно такого объема плотины была создана правобережным взрывом в Медес, при котором масса ВВ составила 5290 т, что превосходит массу зарядов в Байпазах более чем в 2,5 раза. Эти цифры показывают, что удельный расход ВВ при взрыве в Байпазах оказался в 2,5 – 3,0 раза меньше, чем в Медес.

При проектировании Байпазинского взрыва ожидалось, что будет вметь место оползание. Высказывались различные предположения о масштабах этого явления: Однако надежные количественные оценки сделать было невозможно. И только опыт взрыва в Байпазах позволил однозначно ответить на этот вопрос.

Байназинский взрыв, как и взрывы в Мелео, подтвердили необходимость уточнения методики расчета крупных взрывов, хотя его результаты оказались ближе к проективым. Этому в некоторой степени способствовало то обстоятельство, что при проектировании Байлазинского взрыва учитывался опыт Медео. Вместе с тем многие прогнозы не подтвердились и в Байлазинском взрыве. Так, например, скорости движения взорванной породы оказались намного меньше, чем предполагалось в проекте на основании работ [44, 76]. Это еще раз подтверждает важность задачи об установлении связи между кинематическими параметрами взрыва и его начальными характеристиками, на основе которой в дальнейшем может быть разработана методика расчета крупных взрывов вблизи склонов.

Опыт крупных взрывов в Байлазах вслед за опытом взрывов Медео подтвердил возможкость создания взрывным способом больших плотин, способных не только противостоять селевым потокам, но и удержать напор воды.

2.4. Начельная стадия развития взрыва вблизи свободной поверхности

Исследованию камуфлетного вэрыва посвящена общирная литература [35]. Ниже будут изложены лишь некоторые результаты этих исследований, которые сравнительно мало известны в литературе. К тому же они в максимальной степени, по условиям проведения, приближаются к обсуждаемым вэрывам вблизи наклонной свободной поверхности. Результаты камуфлетных вэрывов здесь представляют интерес потому, что закономерности их развитии характеризуют начальную сталию развития вэрыва вблизи свободной поверхности. До момента выхода волны сжатия на свободную поверхность все явления при вэрыве в однородном массиве обладают пентральной симметрией, и для их описания можно использовать те закономерности, которые характерны для камуфлетного вэрыва.

Наиболее полное исследование камуфлетного взрыва в скальных породах было проведено в серии экспериментов с зарядами массой 1, 6, 190 и 660 т в мраморизованных известняках. Кроме того, были также получены некоторые данные о вэрыве в аналогичных породах в лабораторных условиях, сопоставление которых с крупными взрывами позволило исследовать камуфлетный взрыв в широком диапазоне массы зарядов.

Основной интерес при исследовании начальной стадии вэрыва представляет кинетическая энергия среды и упругая потевциальная энергия сжатия, т.е. тот запас внергии, который после выхода волны на свободную поверхность будет участвовать в совершении механичес-



Рис. 34. Осниплограммы массовых скоростей на различном расстоянен при камуфиетном вэрыве в скальном грунте заряда массой 1 т

кой работы по перемещению породы. В опытах непосредственно измерявась массовая скорость во времени. Типичные осциплограммы скорости приведены на рис. 34,

На основании результатов измерений была построена зависимость скорости от расстояния и массы заряда (рис. 35) и получена эмпирическая формула

$$v_{\max} = 3.6 \left(\frac{o^{1/3}}{R}\right)^{1.75}$$
, (12)

где V тах - максямальная скорость в волне сжатня, м/с; R - расстояние, м.

Зависимости максимальных смещений в волне сжатия от относительных расстояний приведены на рис. Зб в могут быть описаны ураввением



Рис. 35. Зависимость максимальной скорости в волне сжатия от расстояния при камуфлетном вэрыве заряда массой 1 т(1), 6 т (2) и 190 т (3)

$$\frac{w_{\text{max}}}{\varrho^{1/3}} = 280 \left(\frac{\varrho^{1/3}}{R}\right)^{1/3} 1 \quad (13)$$

где w — Смещение, мкм. Формулы (12) и (13) справедливы для расстояний от 2 до 100 радаусов заряда. Их структура показывает, что поле массовых скоростей и перемецений в волие сжатия в широком диапазоне массы зарядов и расстояний моделируется по геометрическому закону подобия.

Для вычесления кинетической енергии движения среды использовались записи скорости во времени на различных расстояниях от центра взрыва.

Используя опытные осцияпограммы, по формулам теории упругости были вычислены суммарные эначения упругой и кинетической энергии для некоторых расстояний (табл. 10). Из табл. 10 вилно. что

энергия убывает по мере распространения волны, что свидетельствует о ее поглощении.

Для задачи о выбросе наибольший интерес представляет величина енергии на малых расстояниях (0,4 – 0,5 м/кг^{1/3}). Полных ослилпограмм массовой скорости на таких малых расстояниях получить не удалось, поэтому необходимо провести экстраноляцию. На рис. 37

приведена зависимость $E/E_0 = \binom{R}{0^{1/3}}$. Следует отметить наличие значительного разброса точей на этом расунке. В то же времи в значениях максимальных скоростей в волне сжатия, как видно из рис. 35, разброс гораздо меньше. Это связано, очевидно, с некоторой неопределенностью записей скорости за фронтом волны (см. рис. 34). Несмотря на имеющийся разброс точек на рис. 37, их можно описать прямой линией. Видно, что энергия в волне сжатия при радиусе ее фронта порядка 0,4 - 0,5 м/кг^{1/3} равна 7 - 8% нолной энергии взрыва:

Таким образом, при вэрыве в скальных породах в момент выхода фронта волны сжатия на свободную поверхность она содержит около 10% энергии вэрыва, которую можно использовать для механической работы. Следует отметить, что эта энергия симметрично распределе-

Таблица 10

Масса заряда, т	Расстояние, м	Приведенное рас- стоянне, м/кг1/3	Отношение <i>Е./Е</i> 0. %
6	41,5	2,28	0,63
	88,5	4,86	0,58
	112	6,15	0,52
	192	10,55	0,26
	221	12,1	0,44
190	105	1,83	2,66
	240	4,17	2,68
	260	8,0	0,83
660	145	1,67	4,32
20	369	4,25	1,41
	710	8,15	0,9

на по всем направленням. Очевидно, при определении роли волны скатна в процессе выброса надо учитывать ту энергию, которая окажется в пределах телесного угла, обращенного в сторону будушей воронки. Для выброса с показателем 1,1 – 1,4, который нанбо-

пее часто используется при вэрывах на склонах, в пределах указанного угла среде за счет волны сжатая будет сообщена эвергия движения, примерно равная 1,5 - 2,5 % полной энергии вэрыва. Если энергия выбрасываемой породы больше указанной величины, то это увеличение следует связывать с действием лазового ускорения.

2.5. Опытные взрывы на склонах

⁹ 5.1. Формулировка задач ис-

Осуществление строительства селезащитной плотины в Медео в водонапорной плотины Байпа-



Рис. 36. Зависимость максимального смещения в волне сжатия от расстояния при взрыве зарядов массой $1 \tau (1)$, $6 \tau (2)$, $190 \tau (3)$ и 660 $\tau (4)$



Рис. 37. Зависимость приведен- . ной енергин (упругой и кинетической) в волне сжатия от приведенного расстояния

зинского гидроузна подтвердило высокую вффективность взрывного метода создания завальных плотин. Одновременно BLISCHRпось. что методы прогнозирования результатов действия крупных взоывов не всегда обеспечивают нужную точность. Ряд вопросов. таких как роль забояки при вэрывах, направленность действия варывов вблизи склонов и другие. в свете накопленного опыта использования крупных взрывов приобрели новую постановку, и их решение на базе имеющегося опыта использования подземного варыва оказалось практически невозможным. Все это вместе взятое показало, что необходими провеление нового систематического исследования действия подземного взрыва вблизи наклонной свободной поверхности. На основаник анализа результатов крупных промышленных взрывов

были сформулированы задачи исследований, накболее важными из которых являются следующие:

1) исследование роли забойки подводящих выработок;

 изучение вопросов подобия при взрывах на сброс, лежащих в основе существующих методов расчета их действия;

 выяснение основных параметров, определяющих направленность действия вэрыва;

4) изучение .особенностей групповых вэрывов по сравнению с единичными, и выяснение влияния интервалов замедления на еффект действия группового вэрыва;

5) изучение сейсмического еффекта при подземных взрывах;

6) влияние п.н.с. и угла склона на эффект выброса породы.

Совершенно очевидно, что для решения этих задач необходимо было провести систематические исследования на базе анализа имеюшихся данных по подземному взрыву и проведения дополнительных опытных взрывов.

В 1969 г. Институтом физики земли АН СССР и трестами Казаказрывиром и Союзвэрывиром была составлена программа таких опытных вэрывов, которая и была осуществлена в течение 1970 – 1974 гг. Основу втой программы составляли вэрывы в крепких скальных породах вблизи склонов. В 1970 г. было проведено 5 одиночных вэрывов с зарядами массой 10 т при различных значениях л.н.с. Масса заряда опытных вэрывов, равная 10 т. была определена ва основания накоплекного опыта проведения подземных вэрывов как наяболее оптимальной. При меньшей массе зарядов, вэрываемых в скальных породах, как правило, наблюдается эначительный разброс даяных, обусловленный неоднородностями естественных массивов пород. Более крупные вэрывы, естественно, являются наиболее представительными, но их проведение в большом количестве практически невозможно из-за большой стоимости и трудоемкости экспериментов.

В течение 1971 - 1972 гг. было проведено девять взрывов, включая одиночные взрывы зарядов массой 10 т, и групповые взрывы общей массой зарядов одного взрыва до 20 т. Заключительная серия опытов, проведенных в 1974 г., включала четыре взрыва с зарядемя массой от 5 до 100 т.

При проведении опытных вэрывов были организованы инструментальные наблюдения за основными параметрами их действия, такими как динамические характеристики движения породы на различных стадиях развития вэрыва, параметры распределения взорванной породы и воронок выброса, основные параметры сейсмических колебаний и другие. Главной целью наблюдений было решение перечисленных выше задач. По большинству из них получены достаточно надежные данные, хотя степень их решения далеко не одинакова. Естественно, что столь широкий круг задач не мог быть решен за такой сравнительно ограниченный срок.

Наже дается изпожение первичных данных по каждой из указанных выше серий взрывов, а затем проводится их совместный анализ с использованием некоторых результатов по крупным промышленным взрывам. Учитывая уникальность проведенных экспериментов, а также тот факт, что столь широкое исследование проводилось впервые, в самом начале будут освещены некоторые методические вопросы, которые в равной степени относятся ко всем проведенным сериям опытных взрывов.

При изложении результатов опытных взрывов преспедовалась прежде всего задача сохранения основного первичного материала, представляющего большую самостоятельную ценность, независимо от того, насколько он потом используется при построении обобщающих представлений. Этот материал является тем критерием, по которому можно проверять как те представления, которые развиваются в данвой работе, так и любые другие представления о действии подземного взрыва, которые уже имеются или будут разрабатываться в далькейщем.

2.5.2. Методические вопросы

Одним из первых вопросов, с которым пришлось столкнуться при составлении и реализации программы опытных взрывов, был вопрос о выборе площадок, пригодных для проведения работ. Условия проведения промышленных взрывов, естественно, диктуются практическими нуждами, и для исследовательских целей они, как правило, бывают довольно сложными. Взрываемые склоны при этом в большинстве случаев бывают неоднородными, часто осложнены дополнительными

ушельями и выступами, углы взрываемых склонов при этом могут меняться в широких пределах. Само ущелье, в котором возводится завальная плотина, при промышленных взрывах также имеет свои особенности: его выбирают по возможности узким. В результате распределение взорванной породы в гораздо большей степени оказывается зависимым от профиля самого ущелья, чем от параметров двюжения взорванной породы.

При выборе опытных площадок стремились всегда обеспечить два условия; примерное постоянство угла склона в данной серки опытов и отсутствие вли довольно далекое расположение противоположного склона, Первое условие необходимо, поскольку эффект вэрыва зависит от угла склона. На первом этапе исследования было желательно исключить этот параметр с тем, чтобы для одного угла исследовать основные закономерности развития взрыва. Второе условие также очевидно: необходнмо было в относительно чистом виде исследовать результаты действая самих вэрывов. Поэтому взорванную породу надо было укладывать на горизонтальную поверхность. Удовлетворение указанным условиям оказапось довольно затруднительным, в во всех сернях опытов они были выполнены приближенно. Угол склона менялся в пределах 30 - 40°С, при этом постоянство угла склона даже в пределах действия одного взрыва не всегда удавалось выдерживать точно. Высота склонов выбирелась из условия, чтобы разрушающее действке взрывов не достигало их вершины. В основном ето усповне было выполнено во всех . сернях вэрывов.

Учитывая трудности подбора площадок, а также обеспечения, подготовки и проведения самих работ, география опытных участков оказапась довольно пестрой. Первые две серии были проведены в Казахстане, причем в разных районах, третья серия в Киргизии. Породы на всех площадках были представлены гранитами, хоти степень их трещиноватости была несколько различной.

Закладка зарядов ВВ в масскам горных пород производилась через горязонтальные штольня. Плошадь сечения етих штолен во всех случанх была примерно одинаковой и составляла 2,5 - 3 м². Штольни проходились взрывным способом. В целях обеспечения минимально возможного их сечения уборка породы из штолен производилась скреперованием с помощью электрических лебедок. Типичные схемы расположения зарядов приведены на рис. 38,

Основная масса опытных вэрывов производилась с однночными зарядами, которые располагались в зарядных камерах (рнс. 38, а, б). Забойка подводящих выработок при втих вэрывах осуществлялась в двух вариантах. Первый вариант – забойка раздробленным камнем (шебенкой) – рис. 38, а. Этот тип забойки применяется при промышленных вэрывах, поэтому в последующем он будет называться обычным типом забойки. Как правило, при вэрывах в скальных породах обычная забойка всегда выбрасывается, и через подводящую выработку происходит интенсивный выхой газообр. зных продуктов детонации. Чтобы исследовать возможные потери внергии при этих выбросах газов, необходимо было в некоторых опытах обеспечить герметичную закупорку продуктов вэрыва в котловой полости. С этой целью была



Рис. 38. Слемы расположения. зарядов, подводящих выработок и забоек при одиночных и групповых взрывах:

1 - заряд; 2 - подводящая выработка; 3 - обычная забойка; 4 - бетов

применена комбинированная забойка (рис. 38, 6), состоящая из пвух участков. На первом участке, примыкающем непосредственно к заряду, забойка осуществлялась обычным способом (щебенкой), второй участок штольни бетонировался. Опыт показал, что для обеспечения герметизации котловой полости в течение времени от момента детовации ВВ до момента прорыва продуктов взрыва через разрушенную породу в сторону л.н.с. достаточно забетонировать участок штольни длиной 5 - 7 м. При этом могут быть использованы сравнительно низкопрочные сорта бетона с выдержкой после окончания бетонирования в течение 2 - 3 сут. Оценки показали, что стоимость осуществления забойки олеой штольни не превышает 500 руб. При

2436







Рис. 40. Очертание купола и выброса газа из штольни в различные моменты времени при вэрыве заряда массой 100 т (цифрами указаны номера кадров; частота съемки - 59 кадров в секунду)

этом следует подчеркнуть, что эта стоимость существенно не менеется с изменением масштабов взрыва (при сохранении площади сечения штольни). Если учесть, что даже для взрыва заряда массой 10 т она составляет 20 – 25% общей стоимости взрыва, то применительно к подавляющему большинству промышленных взрывов стоимость устройства комбинированной забойки следует считать незначительной. Эффект же действия взрыва от применения комбинированной забойки, как будет показано ниже, возрастает в 1,5 – 2,0 раза, что свидетельствует о явной целесообразности ее широксто применения на практике.

Групповые вэрывы (рис. 38, в) по методике проходки подволяших выработок и закладке ВВ практически не отличались от одиночных. В опытах применялась двухрядная схема расположения зарядов, при этом в первом рыду располагалось три заряда, во втором ряду – один заряд. Вэрывание при всех групповых вэрывах пронзводилось как мгновенно, так и с интервалом замедления второго ряда по отношеино к первому. В последнем случае осуществлялся контроль за порядком вэрывания с помощью сейсмических датчиков, на которые фиксировали моменты вступления воли от первого и второго взрывов. Как правило, фактические интервалы замедления не совпадают с паспортными данными для соответствующих капсюлей, что, кстати, имело 80 уесто и при промышленных вэрывах. Повтому контроль за порядком карывания зарядов при групповых взрывах представляется необходиным во всех случаях.

Существенным методическим вопросом является организация инспрументальных наблюдений. Во всех сериях опытных варывов производилась киносъемка, измерение параметров сейсмических воли и меркшейдерская съемка,

В задачу киносъемки входила прежде всего подробная регистрация начальной стадии движения поверхности склона. Для повышения точвости измерения смещения отдельных точек склона в икх устанавливаля специальные реперы в виде черно-белых крестов, которые скрепляли с поверхностью земли. По смещению этих крестов, которые отчетливо видны на кинокадрах (рис. 39), удается измерить начальные смещения склона с точностью до 10 см. При каждом взрыве устанавливалось по пять – восемь реперов. Как правило, они располагались вдоль линии, проходящей через точку выхода на поверхность л.н.с. и апищентр взрыва. Киносъемка велась с направлений, примерно перпендкулярных 'к пинии расположения реперов.

В опытах использовалась киноаппаратура с различной разрешающей способностью, что позволяло надежно регистрировать как начальвые стадии движения реперов, так и общую картину развития выброса вороды, вплоть до прорыва газов через купол и укладки породы в тепо плотины. Характерные фотографии, на которых показаны последовательные стадии развития двух типичных вэрывов, приведены на рис. 39. Из них видно, как при взрыве с обычной забойкой (а) из устья штольни вырываются газообразные продукты вместе с материалом забойки. Начальная скорость выброса составляет 300 - 500 м/с. Важво подчеркнуть, что этот прорыв газов происходит на ранних стадиях, когда поверхность в районе выхода п.н.с. практически еще не испытапа заметных смещений. При взрыве с комбинированной забойкой (б) прорыв газов через штольню полностью отсутствует. На первом кадре пишь видна вспышка, обусповленная началом детонации ДШ, по которому она передавалась от устья штопьни к заряду. Начальные стаачи подъема купола происходят при полном отсутствии газовых прорывов, и только при достаточно сильном поднятии поверхности склона происходит прорыв газов через зону раздробленной породы.

Следует отметить, что первоначальный прорыв продуктов детонаим при вэрывах на склоне в большинстве случаев происходит не по л.н.с., как при вэрывах на выброс, а примерно по вертикали, т.е. в направлении эпицентра вэрыва. С этим же, очевидно, связан и тот факт, что форма купола при взрывах на склоне очень часто бывает несимметричной относительно точки выхода л.н.с. На рис. 40 привелены очертания поверхности склона в различные моменты времени аля наиболее характерных случаев. Из них видно, что нарушение симметрии происходит за счет более. сильного поднятия эпицентралькой части склона, расположенной над зарядом. Максимальная скорость подъема склона в некоторых случаях наблюдается не в точке выхода л.н.с. на поверхность, а выше этой точки. Поэтому при изложении опытпых данных наряду со эначением максимальной скорости по л.н.с.

81

11-1

приводятся также, если таковые имеются, наибольшие скорости, зарегистрированные в опыте. При групповых взрывах указывается скорость, соответствующая точке выхода п.н.с. заряда № 2, расположенного в первом ряду.

Направление прорыва газов в сторону эпицентра, обусловленное, очевидно, условиями разрушения породы вблизи поверхности склона и действием силы тяжести, оказывается благоприятным с точки зрения распределения взорванной породы. Прорываясь вверх, газы относительно слабо влияют на укладку взорванной породы. В случае же прорыва газов по штольне, особенно при многорядных взрывах, происходит встреча потока газов с раздробленной породой, в результате чего последняя подвергается дополнительному разбрасыванию. Пример такого действия продуктов взрыва был приведен выше при описании правобережного взрыва в Медео.

Сейсмические колебания регистрировались в четырех – шести точках, расположенных на различных расстояниях от центра вэрыва, а показания сейсмоприемников – на осциплографах типа Н-700 или ОШ-9, которые включэлись автоматически синхронно с моментом подрыва заряда. В качестве сейсмоприемников использовали вибрографы типа Виб-А и С5С.

Существенным методическим вопросом является измерение параметров навала взорванной породы и видимой воронки выброса. Дело в том, что масштабы опытных взрывов по сравнению с масштабами крупных промышленных вэрывов невелики, а точность измерения требуется высокая. Поэтому маркшейдерскую сьемку необходимо производить детально. Обычкая съемка, когда уровень поверхности земли ре-ГИСТРИРУСТСЯ В ОТДОЛЬНЫХ ТОЧКАХ. А ПОТОМ НА ОСНОВАНИИ ВТИХ ТОЧСК строятся изолники равных уровней поверхности, оказалась непригодной из-за инэкой точности определения объема навала. Для повышения точности во всех опытах, начиная со второй серии, маркшейдерская съемка производилась по профилям. Существо такой съемки состоит в следующем. Перед взрывом снимается основной профиль склона вдоль линии, проходящей через эпицентр вэрыва и точку выхода п.н.с. на поверхность склона. Детальность съемки этого профиля зависит от рельефа поверхности в может быть сделана достаточно надежно сгущением точек .съемки в местах резкого изменения рельефа. Паралпельно основному профилю в обе стороны от него намечается и снимается еще по четыре-пять профилей. Число профилей и их расположение выбираются таким образом, чтобы они покрывали всю поверхность склона и прилегающего участка полки, которая окажется в зоне развала взорванной породы. Типичная скема расположения профилей похазана на рис. 41. Расстояние между профилями зависит от масштаба вэрыва и в опытах изменялось от 5 до 10 м.

Основной профиль фиксируется таким образом, чтобы после вэрыва его положение можно было точно восстановить. Для этого достаточно съемку до вэрыва производить с некоторым запасом с тем, чтобы крайние точки не попадали в зону воронки и навала породы. После вэрыва они легко восстанавливаются и съемка склона производится в точности по тем же линиям, что и до вэрыва. Накладывание

профилей вдоль данной линии, снятых до взрыва и после него. обеспечквает надежное определение изменения профиля склона в вычисление навала или глубины воронки. Объем навала и воронки выброса подсчитывали суммированием влементарных объемов, расположенных между соседними профилями. Каждый элементарный объем равен произведению средней площади сечения навала в двух соседних сечениях на расстояние между ними. Центральные профили для взрывов с л.н.с., равной 11, 30,9 и 15,4 м (массы зарядов соответственно 10, 100 и 10 т), приведены на рис. 42, а,б.в. Следует обратить внимание на то, что при вэрывах на склонах наиболее устойчивой характеристикой действия взрыва является объем вавала, который и представляет как раз наибольший практческий интерес. Что же касвется формы и объема видимой воронки, то эти параметры весьма неустойчивы. В зависи-



Рис. 41. Схема расположения заряда (1), подводящей штопъни (2), контура навала (3), видимой воронки (4) и профилей (5), по которым производилась съемка склона до взрыва и после него

мости от состава пород, спагающих верхнюю часть склона и расположенных над воронкой, наблюдаются различные степени их обрушения. В некоторых случаях видимая воронка оказывается практически полностью засьшанной в результате оползания вниз верхней части склона. Однако в тех случаях, когда верхний слой склона сложен хрепкими породами, а угол наклона поверхности невелик, обрушение минимально, и видимая воронка может быть также использована в качестве одного из параметров, характеризующих взрыв.

2,5,3. Первичные данные опытных взрывов

Изпожение первичных данных, полученных в опытных взрывах, будет проведено отдельно по каждой из трех серий.

Результаты взрывов на первом участке. Первый участок расположен вблизи Канчагайского гидроузла. Для проведения взрывов было выбрано ущелье шириной по дну примерно 100 м. Один борт ущелья имел высоту около 50 м с углом падения склона приблизительно 300 и протяженностью вдоль ущелья более 400 м. В табл. 11 привелены Ссновные данные по взрывам, проведенным на первом участке.





Выбор величин л.н.с. был осуществлен в целях проверки работы взрыва в различных усповиях, начиная от максимального выброса пориды из воронки и кончая взрывам рыхления. Минимальная л.н.с. быпа взята по американским взрывам зарядов массой 18 т, проведенным на различной глубине вблизи горизонтальной поверхности земли [35]. Согласно етим данным, оптимальная глубина, обеспечивающая максимальные размеры видимой воронки для заряда массой 10 т, ривна около 11 м. В соответствии с выбранными л.н.с. длины штолен, через которые закладывалась ВВ, для зарядов массой 10 т равиялись 25 - 30 м, а для 100 т - около 50 м.

Основными задачами первой серии опытов были следующие:

1) отработка методики проведения опытных вэрывов и организвции инструментальных наблюдений;

2) выяснение влияния л.н.с. на эффект действия взрыва;

3) оценка ропи заболки.

Для измерения начальной скорости движения поверхности склона в некоторых опытах наряду с методом киносъемки были использованы приборы ЖИС, обеспечивающие электромагнитную регистрацию скорости с непрерывной записью на пленке осциплографа ОШ-9.

Наиболее характерная запись начальной стадии движения поверхности склона в районе выхода п.н.с., полученная с помощью этих приборов в опыте № 3, приведена на рис,43. Сопоставление с данными киносъемки показало согласованность обоих методов регистрации. Из

2436

Ŧ	ł
	_
1	2
-	Ξ.
1	-
÷	
2	2
Ĺ	2
τ	

Номер	Л.н.с., м	Угол склона в районе во- ронки, градус	Забойка штопьни	Радиус видимой ворояки, м	Макск- мальвая гтубина воронки, м	Объем ви- демой во- ронки, м3	Малск- малькая скорость, по п.в.с., м/с	Объем на- вала, м ³	Максимальная дальность разпета поро- ды, м
F	10,5	30	Обычная	20,2	3,8	3530	1	10 800	Bonee 120
2	11,0	34	*	16,7	4	2570	42	ı	. 110
e)	11,2	35	Комбикированная, 1-2	16,9	9	4500	42	t	- 120
•			yracrok - 4 M, 2-å	5					
			YMACTON - 3 M						
4	15,6	28	Обычная	15,8	4	2950	22	5800	80
ເດ	17,8	29	Комбинированная, 1-й	14.5	2	2050	19	0006	70
			участок - Зм, 2-й						
	_		YFACTOR - 4 M					_	

ł



Рис. 43. Осциплограммы скорости начальной стадии движения поверхности склона, попученной прибором ЖИС записей вкано, что скорость в опыс те № 3 довольно быстро (за 2 -З мс) достигает некоторого значения. затем примерно в течение 6 - 10 мс наблюдается ее спал. после чего продолжается более плавное нарастание скорости до некоторого максимального значения. Палее скорость постепенно убывает. Исключение составляют лишь те участки поверхности склона, на которых происходит прорыв газообразных продуктов из котповой попости. Зависимость максимальной скорости движения различных точек поверхности склона от расстояния приведена на рис. 44. Пунктирной линней показана эмпи-

рическая зависимость, построенная на основании данных рис. 35 и характеризующая удвоенную скорость в волне сжатия. Сопоставление похазывает, что максимальная скорость в 1,7 - 1,8 раза больше той скорости, которая должна быть в данной точке на фронте волны сжатия после ее отражения от свободной поверхности. Этот фект наиболее просто объяснить действием газового ускорения, на что, в частности, указывает и то, что начальная скорость, соответствующая первому максимуму, примерно совпадает с удвоенным значением скорости в волне скатия.

Однако в таком объяснении характера изменения скорости движения поверхности склона есть некоторые противоречия. Так, несколько странным кажется тот факт, что степень увеличения скорости оказапась практически независимой от скорости и от попожения точек по отношению к месту выхода л.н.с. Согласно данным работы [15], можно было бы ожидать большего увелячения скорости в опытах с меньшими п.н.с. и в точках, расположенных вблизи вершины купола. Отсутствне такой коррепяции может быть, конечно, объяснено недостаточностью опытных данных и тем обстоятельством, что скорость в волне сжатия при ее распространении внутри массива в опытных взрывах непосредственно не измерялась. Однако возможно и другое объяснение: наблюдаемое увеличение скорости на начальных стадиях подъема поверхности склона вообще не связано еще с газовым ускорением. Оно может быть следствием перераспределения кинетической энергии в волне сжатия за счет изменения напряженного состояния массива вблизи свободной поверхности. Чтобы убедиться в возможности такого объяснения, произведем некоторые оценки. Как видно из работы [52]. распределение скоростей в момент выхода фронта волны на свободную поверхность приближенно выражается уразнением

$$v = v_{\oplus} \left(\frac{R_{\oplus}}{R}\right)^{1/5}$$
,

(14)

т.е. скорость нарастает в направлении к полости вэрыва и вблизи полости может существенно превосходить значение се на фронте. После выхода волны на поверхность начинается процесс выравнивания скоростей в слое грунта вад зарядом, при этом скорость верхних споев карастает, а слоев, прилегающих к полости . убывает. Кинетическая энергия слоя грунта над зарядом может быть выражена уравнением

$$E_{\rm K} = \int_{r_{\rm R}}^{h_{\rm B}} \frac{\rho v^2}{2} dR, \qquad (15)$$

где г_п - радкус полости; h₃ - глубина запожения заряда; V - СКОРОСТЬ - ДВИЖения в интервале г, -h, которая изменяется от точки к точке и выражается уравнением (14).

Решение уравнения (15) дает

$$E_{\rm g} = \frac{\rho v_{\rm p}^2 h_3}{4} \frac{h_3^2 - r_0^2}{r_2^2} \qquad (16)$$

Кинетическая енергия этого же слоя после выравнивания в нем скоростей



Рис. 44. Зависимость максимальной скорости движения точек поверхности склона от их расстояния до центра заряда при варывах зарядов массой 10 т с различ-HEIME T.H.C.: 1-11,2м; 2-11 м; 3 - 15,6 м, 4 -17.8 M

$$E_{\rm K} = \frac{\rho (h_3 - r_{\rm R})}{2} v_{\rm cp}^2.$$
 (17)

Приравняв (16) н (17), получим

$$\frac{v_{\rm CD}}{v_{\rm p}} = \sqrt{\frac{h_3 (h_3 - r_{\rm fl})}{r_{\rm fl}^2}} \quad . \tag{18}$$

Вычисление по формуле (18) для взрыва зарядов массой 10 т, при которых образуется попость раднусом 3 -4 м. и h3 = 11+17м, показывает увеличение средней скорости по сравнению со скоростью на фронте в 3 - 6 раз. Фактическое отношение максимальной скоросте движения поверхности склона, которую можно считать как среднюю скорость в спое над зарядом, к скорости на фронте, как видно из рис. 44, равно 3,5. Это эначение укладывается в тот диапазон, который дает формула, т.е. наблюдаемое в опытах возрастание скорости после первого максимума может быть в количественно объяснено выравниванием поля скоростей, созданного волной сжатия, без привлечения действия газового ускорения. Об втом же говорят и значения инетической энергии выбрасываемого грунта, которые были определе-

гы в опытах № 1, 4 и 5 суммированием энергии движения отдельных конических элементов купола и оказались соответственно равными 2,3, 3,5 и 1,6%, т.е. в среднем 2,4±0,6%. Эта величина близко совпадаетс тем запасом кинетической энергии, который обеспечивает волна сжатия.

объяснения факта некоторого нарастания скорос-На возможность ти за счет перераспределения кинетической энергии в волне сжатия указывает также внализ более поздних стадий движения склона в опытах № 2 и 3. Собственно газовым ускорением в этих опытах можно считать стадию, когда в районе выхода л.н.с. появляется усиленный выброс породы и газов. Эти выбросы в указанных опытах оказались различными, что согласуется с различиями в характере применявшихся забоек. Начальные стадии в обоих опытах, как видно из табл. 12, примерно одинаковы. Однако последующее развитие куполов происходит по-разному. Прорыв газообразных продуктов в опыте № З наблюдался через 0,09 с, а в опыте 2- через 0,16 с после начала движения, что свидетельствует о более сильном действии газов при вэрыве с комбинированной забойкой. Соответствующие различия оказались и в начальных скоростях движения прорывающихся газов: в опыте № 2 ета скорость равнялась 124 м/с, а в опыте №3 - 200 м/с. По-видимому, собственно газовсе ускорение проявляется на более поздних СТАДКЯХ, В ТО Время как начальное движение поверхности, включая нарастание скорости, в основном связано с действием волны сжатия.

Вопрос о влиянии л.н.с. на действие вэрыва вблизи склона целесообразно рассмотреть в сопоставлении с данными по взрывам на выброс. Наиболее подходящими для сравнения являются упоминавшиеся выше результаты американских взрывов зарядов массой 18 т. Параметры их приведены в табл. 12.

Наибольшая воронка, как видно из табл. 12, наблюдается при глубине заложения 13 м. что соответствует приведенной глубине 5 м/ $r^{1/3}$. Для заряда массой 10 т оптимальная глубина должна составлять 10,8 м, при етом видимая воронка будет иметь объем 2100 м³, раднус 14,2 м и глубину 8,6 м.

Из табл. 11 видно, что при вэрывах вблизи наклонной свободной поверхности максимальный объем воровки наблюдается при л.н.с., равной 10 -11 м., т.е. оптимальное расстояние от заряда до свободной поверхности, при котором происходит максимальный выброс породы, оказалось практически независимым от ориентации свободной поверхности, по крайней мере при изменении угла ее наклона от О до 30". Однако формы видимых воронок при вэрывах у склона и на выброс заметно отличаются. Радиусы воронок в обоих случаях примерно совпадают, и основное различие проявляется в максимальной глубине. При втом следует подчеркнуть, что несмотря на меньшую глубину воронок на склонах объем их примерно в 1,5 раза больше соответствуюшего объема воронки при взрыве на выброс. Это связано с тем, что воронки при взрывах на склоне характеризуются сравнительно плоским дном, в то время как при взрывах на выброс они имеют почти коническую форму. Необходимо также отметить, что в первой серии опытов обрушение склона над воронками было выражено слабо, поэтому видимые воронки выброса на склонах довольно хорошо выражены. 88

Таблица 12

Номер взры ва	Глубина за- пожения, м	Радиус види- мой воронки, м	Глубина види- мой воронки, м	Объем види- мой воровки, м ³	
1	7,7	13,6	7,6	1780	
2	13,0	17,3	10,5	3760	
3	18,0	11,2	4,9	650	

Примерное совпадение начальных стадий движения при вэрывах с различными забойками наводит на мысль, что эти стадии вообще спабо зависят от условий вэрывания, в том числе и от ориентации свободной поверхности. Это эначит, что и зоны разрушения массива, т.е. размеры истинных воронок, которые в основном определяются именно начальными стадиями вэрыва, скорее всего будут также спабо зависеть от угла наклона свободной поверхности. С этим согласуется факт примерного равенства радиусов видимых воронок, отмеченный выше (см. табл. 11 и 12). Увеличение объема воронки при взрыве на склоне объясняется, очевидно, более легкими условиями выброса породы из наклонной воронки, поскольку сила тяжести действует не навстречу движению, а под некоторым утлом.

Результаты измерения объемов навала породы в опытах первой серни оказались менее надежными. Съемка начального положения склова была подробно выполнена лишь на участках будущих воронок. Поэтому определение высоты навала породы и соответственно вычисление ее объемов удалось сделать лишь приближенно. Особенно низкая точность была в опытах № 1 - 3, где из-за относительно малых п.н.с. произошло интенсивное разбрасывание породы. Однако и во этим объемам, как видно из табл.11, можно заключить, что максимальный выброс породы наблюдался при п.н.с., равной 10-11.м. И тем не менее взрывы с такими п.н.с., с практической точки зрения, зако неудовлетворительны. Порода при них разбрасывается на большой площади, что затрудняет создание компактных завалов. Гораздо пучший эффект образования завальных плотии наблюдался при взрывах с приведенным значением п.н.с. около 7 - 8 м/т1/3. Именно эта л.н.с. на основании результатов первой серии была принята в качестве оптимальной и большинство поспедующих взрывов проводилось примерно при этом эначении.

Резупьтаты взрывов на втором участке. Проведением опытных взрывов на втором участке преследовалось решение спедующих основвых задач:

 продолжение изучения роли забойки штольни на объем выброса в распределение взорванной породы;

 оценка особенностей групповых взрывов по сравнению с одивочными;

 изучение направленности выброса породы при вэрывах на склоне,

12-1

Кроме решения етих задач предполагалось также уточнить влияние п.н.с. при относительно больших ее значениях.

Для решения поставленных задач была запланирована серия взрывов, состоящая из пяти одиночных взрывов массой 10 т каждый и четерых групповых взрывов с двухрядным расположением зарядов. Суммарная масса зарядов в групповых взрывах первоначально намечалась равной 20 т. Однако в процессе проходки штолен и зарядных камер были допушены некоторые отклонения от проекта, поэтому масса зарядов была скорректирована в соответствии с фактическими значениями п.н.с. При этом приведенное значение п.н.с. во всех групповых взрывах сохранялось одинаховым.

Вэрывы на втором участке проводились в два этапа. В течение 1971 г. было проведено четыре вэрыва (три одиночных и один групповой), а в 1972 г. – пять вэрывов (два одиночных и три групповых). Все вэрывы проводились в одном и том же районе, предстайленном двумя сходящимися ущельями. Углы склонов на втором участке были несколько больше по сравнению с углами первого участка и равнялись 30 – 40°. Кроме того, верхний слой на склонах второго участка в некоторых местах был сложен слабыми породами типа суглинков, что привело к более сильному проявлению ополэневых явлений. По остальным параметрам они почти не отличались от склона на первом участке.

Начальные характеристики ворывов приведены в табл.13. Для групповых ворывов эначения л.в.с. по зарядам первого ряда (№ 1 – 3) даны по отношению к поверхности склона, а для заряда № 4 – в направлении предполагаемой плоскости обнажения, образуемой ворывом зарядов первого ряда.

Выбор такой л.н.с. для зарядов второго ряда принят в практике расчета промышленных взрывов. Он является довольно условным, поскольку в действительности указанная плоскость обнажения в большинстве случаев к моменту вэрьша зарядов второго ряда не успевает образоваться. Фактически, эначения л.н.с. для заряда № 4 совпадают с расстояниями между рядами.

Освовные результаты взрывов второй серии приведены в табл. 14. Сечения, вдоль которых снимались профили склона до и после взрывов и определялась фактическая высота навала, располагались через 5 м. В табл. 14 наряду с общим объемом навала приведены также значения объемов по каждому элементу, расположенному между соседними сечениями. Значения объемов в элементах, включающих основное сечение, в табл. 14 отмечены звездочками.

В некоторых опытах сетка сечений, намечавшаяся до взрыва, не перекрывала всего навала породы. В этом спучае подсчитывался объем между крайним сечением и границей навала. При этом размеры крайних элементов в поперечном направлении оказываются больше 5 м, в результате чего возрастают и объемы навалов. В табл. 14 эти опыты легко опознать, поскольку для них значения объемов крайних элементов заметно больше объема соседних элементов.

Породы основного массива во второй серии, как и в первой, представлены гранитами. Однако верхний слой оказался заметно слабее.

Угоп склона, градус	41	38	45	,				35	ï				I								41		
3aбoftka	Обытная																				Комбинирован-	Has, 1 wearner - 4 w	2 VYBCTOK-6M
Интервал замедле- ния, с	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0	0	0		ิณ	0	0	0	-4	0		
Л.в.с., м	22,2	17,3	15,4	10,4	10,01	10,8	13,8	15,4	12,6	12,1	11,0	14,2	10,0	10'01	11,4	13,0	11,0	11,6	13,0	14,5	15,5		
Масса заряда, т	10	10	10	Na 1 - 2,5	No 2 - 2,5	Na 3 - 2,0	N 4 - 7,0	10	61-37	No 2 No 3,7	No 3 - 2,5	Na 4 - 7,8	No 1 - 1,9	Na 2 - 1,9	No 3 - 2,8	Na 4 - 6,0	Na 1 - 2,5	No 2 - 3,0	No 3 - 4,1	Na 4 - 8,3	10		
Расстоя- ние между рядами, м	_ <u>-r</u>	1	1	14				1	14,6				13,4				15,0				1		
Расстоя- ние между зарядами в ряду, м	,	1		11,6			_	1	11,6				11,6				11,6						_
Число за- рядов	Ħ	+	7	4				1	4				4	1			4	2		_	1		
Номер варыва	H	2	07	4				ŋ	Q				2				00				0		

			(Объем на	вала пој	роды (м	пежду сос	Эдними	
Bandca	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
Номер				•					
1	220	670	850	760 ^x	810 ^x	870	855	640	550
2	324	715	843	798	590	551×	551 ^x	458	292
3	164	460	820	962 ^x	650 ^x	600	638	433	405
4	356	129	474	612	525 ^x	690 ^x	867	818	922
5	102	455	569	542	621	767	940 ^x	765 ^x	488
6	67	97	265	608	782	972	1252 ^x	1315 ^x	1161
7	12	83	296	555	770	636	1079	1181 [×]	1031 [×]
8	160	160	81	197	234	286	538	636 ^x	605 ^x
9	271	802	854	846	766	658	728	929 ^x	861 ^x

В зоне действия некоторых взрывов верхний слой представлен наносными отложениями, представляющими смесь пессовидных сутлинков с галькой. В отдельных местах мощность этого слоя достигала 1,5 -2,0 м. Это обстоятельство предопределило характер видимых воронок: в большинство опытов они оказались засыпанными обрушившейся сверху породой. Обрушение в некоторых опытах было столь значительным, что первоначальные воронки оказались полностью засыпанными. Фактические видимые воронки представляют участки склона, на которых произошло понижение первоначального уровня свободной поверхности не за счет выброса, а в результате сползания вииз верхнего слоя спабых пород. Как правило, они и располагаются выше истинной воронки. Более того, на месте истинных воронок в отдельных опытах произошло даже повышение уровня склона за счет обрушившейся сверху породы. За объемом навала во всех опытах принямалась та его часть, которая располагалась ниже истинной воронки, поскольку именно она характеризует эффект сбрасывания породы. Верхняя часть навапа, которвя в основном обусловлена обрушением склона и сильно меняется от опыта к опыту, из общего навала исключалась. Для полноты изпожения данных объемы этой верхней части навала в тех опытах, где он наблюдался, также приведены в табл. 14. Анализ опытов второй серии позволил получить результаты по всем намеченным задачам. Так, из табл. 14 видно, что объем навала в опыте № 9, проводившемся с комбинированной забойкой, примерно в 2 раза больше, чем в опытах № 2, 3 и 5, в которых условия проведения примерно анало-

Таблица 14

. 0946	ннямк)	мЗ				Объем	Объем	Объ-	Макси	Han-
8-10	10-11	11.12	12- 13	13- 14	14- 15	навала, м ³	види- мой ворон- ки,м ³	ем верх- ней части нава- па,м	мапь- ная ско рость купопа по л.н. С, м/с	большая ско- рость поверх- ности склона, м/с
320	-	-	-	-	~	6550	680	1000	10,5	23,5
249	-	-	-	-	-	5560	430 3	200	10,9	12,5
382	147	-	-	-	-	5660	700	100	11,0	12,0
540	1082	-	-	-	-	7020	2780	360	24,0	-
392	199	-	-	-	-	5840	3990	160	24,0	÷ l
841	508	454	541	294	200	9345	3770	800	22,7	-
894	693	372	182	50	-	8132	3164	80	20,0	
845	923	764	455	223	86	6195	4640	307	20,0	-
855	685	492	755	767	1477	11750	4773	648	27,5	-

Таблида 15

Номер взрыва	Масса заряда,т	Л.н.с., м	Длина штольни,м	Угол скло- на, градус	Тип забойки
1	5,1	11,6	25	34	Обычная
2	100,0	30,9	63	40	
3	7,0	13,2	24	39	Комбинированная (см. рис. 38, б): 1-й участок - 6 м, 2-й участок - 5 м
4	85,7	28,1	49	38	Комбинированная, 1-й участок – 10м, 2-й участок – 7 м

Гичны опыту № 9, но забойка подводящих выработок была сбычной. Это согласуется как с данными опытов первой серии, так и с харакпером развития указанных взрывов: в опыте № 9 выход газов через штольню полностью отсутствовал, в то время как в опытах № 2, 3 в 5 имел место интенсивный выброс продуктов детонации на самых начальных стадиях движения поверхности склона.

Результаты варывов на третьем участке. Основная задача третьей серии вэрывов состояла в изучении масштабного эффекта вэрыва,

BB		Объем	навала	а пород	ы (межд	у соседними	сечения	ме), м	3
aqea qe	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Home									
i	130	245	225	328	342 ^x	347*	348	168	73
2	1853	4020	4955	5255	5215	4695 ^x	3730*	3905	4255
3	296	871	1183	1283	1375 ^x	1278 ^x	949	519	179
4	2094	3200	3910	4870	5640 ^x	6955 ^x	6915	6350	8890

включая исспедование роли забойки и сейсмического эффекта при различной массе зарядов. Программа опытов предусматривала проведение четырех вэрывов массой 10 и 100 т, включая два вэрыва (10 и 100 т) с обычной забойкой и два аналогичных вэрыва с комбинированной забойкой. Поскольку в процессе проходки подготовительных выработок эначения л.н.с., как и во второй серии, оказались несколько отличными от проектных, то масса зарядов была скорректирована с таким расчетом, чтобы приведенное эначение л.н.с. во всех опытах было одинаковым и равнялось около 7 м/т^{1/3}. В пересчете на заряд массой 10 т это соответствует л.н.с., приблизительно равной 15 м.

Начальные параметры взрывов третьей серии приведены в табл. 15.

В опыте № 4 первый участок забойки занимал всю боковую рассечку длиной около 8 м и часть основной штольни. Между первым в вторым участками был оставлен воздушный промежуток длиной 8 м. Ущелье, в котором проводились взрывы, довольно широкое, ширина по дну превышала 100 м, причем один борт, в котором проводились взрывы, относительно крутой (35 - 40°), а противоположный борт пологий, повтому породу, как и в двух предыдущих сернях, укладывали фактически на горизонтальную поверхность. Маркшейдерская съемка проводилась по профилям, в опытах малого масштаба (№ 1 и 3) расстояние между соседними профилями равнялось 5 м, а в опытах № 2 и 4 - 10 м.

Результаты вэрывов представлены в табл. 16. По сравнению с данными, которые приведены по первым двум сериям (табл. 13-15), в табл. 16 указаны также интервалы времени между моментами вэрыва заряда и прорыва газов через купол. Момент вэрыва в опытах третьей серии фиксировался на кинокадрах с помощью ДШ, который инициировался у устья штольни. Для опытов с обычной забойкой в табл. 16 указаны также начальные скорости выхода газов по штольням.

Истечение газов начиналось через промежуток времени, меньший 0,02 с: на кинопленке начало выхода и момент детонации ДШ фик-94

Таблица 16

10- 11	11- 12	1'2- 13	Объем навала,м ³	Объем ви- димой во- ровки, м ³	Скорость по п.н.с. до проры- ва купола, м/с	Время прорыва купола, с	Начальная скорость выхода газов из штольни, м/с
-	-	-	2200	1300	13	0,42	350
4570	2600	855	45000	16000	19	1,17	350
32	-	-	8000	1660	20	0,3	-
5176	-	-	54 000	14000	21	0,87	-

сноуются на одном кадре, а частота съемки составляет примерно 50 кадров в секунду. В опытах с комбинированной забойкой выход мазов через устье штольни полностью отсутствовал, т.е. применявшеся забойки обеспечивали надежную герметизацию котловой полосп до момента прорыва из нее продуктов взрыва в сторону л.н.с. через зону разрушений породы. Купола, в форме которых происходило воднятие поверхности склона, во всех опытах были относительно симетричны, максимальные скорости наблюдались примерно в направлении л.н.с. Прорыв же купола происходил, как правило, в верхней части купола, т.е. в эпицентральной области вэрыва. Максимальня скорость прорывающихся газов в опытах с комбинированной забойкой составляла около 100 м/с, В опыте № 1 етот прорыв совсем отсутствовал, а в опыте № 2 скорость прорыва была менее 100 м/с. Снижение скорости газов, прорывающихся через купол, по сравнению о своростью их выхода через штольню является естественным в 03вичет, что при взрывах с комбинированной забойкой выход газов из волости происходит при относительно меньшем давлении, когда провухты детонации уже значительно расширились и произвели работу по перемещению породы. Об этом же свидетельствует и более поздний порыв купола, а также относительно слабая интенсивность втого про-Рыва при вэрывах с обычной забойкой, поскольку в этом случае к коменту прорыва основная масса гвзов уже успевает выйти через подводящие выработки, минуя взорванную породу.

2.6. Некоторые закономерности развития взрывов вблизи склонов

Совместный анализ результатов опытных взрывов с данными по Функым промыпленным взрывам позволил выявить кекоторые об-

2.6.1. Ропь забойки подводящих выработск

Для выяснения ропи забойки используются данные по взрывем одиночных зарядов с обычной и комбинированной забойками, которые проводились примерно при одинаховых приведенных л.н.с. (табл. 17).

Из табл. 17 видно, что характер забойки влияет на объем навапа породы. Так, при взрывах зарядов массой 5 -10 т применение комбинированной забойки увеличивает объем навала породы примерно в 2 раза, а при взрывах зарядов массой 83 - 100 т - в 1,4 раза. Из етих данных видно, что влияние забойки зависит от масштаба взрыва.

На рис. 45 приведена зависимость объема навала породы от мощности вэрыва. Из рисунка видно, что с увеличением массы заряда влияние забойки уменьшается.

Экотраполяция в сторону больших зарядов показывает, что пересечение прямых происходит при массе заряда 1000 т. Это значит, что при взрывании зарядов массой менее 1000 т характер забойки имеет значение, в то время как при более мощных взрывах применение комбинированной забойки не дает заметного увеличения объема сброшенной породы. Накболее сильное влияние забойки наблюдается при малых масштабах взрыва.

Полученный результат о зависимости роли забойки от масштаба взрыва представляется физически понятным. Во всех опытах с зарядами массой от 5 до 100 т площадь сечения подводящей штольни сохранялась постоянной. Постоянство площади сечения означает отсутствие подобия в процессе истечения газов из котловой полости. С уве-



Рис. 45. Зависимость объема породы от массы заряда при одиночных вэрьвах с обычной (1) и комбинированной (2) забойками личением масштаба вэрыва относитепьные размеры канала, по которому происходит выход газов, уменьшаются.

Подавляющее число промышленных вэрывов характеризуется зарядами массой в десятки и сотни тонн. Вэрывы зарядов массой 1000 т являются еще сравнительно редким явлением, Поэтому можно утверждать что в большинстве случаев промышленного использования вэрывов на склонах влияние забойки необходимо учитывать. Особенно это существенно при взрывании серия из малых зарядов (около 10 т), когда за счет качества забояки может быть достигнута 100%-ная вкономня взрывчатых материалов. Затраты на устройство комбинированной забойки при этом неизмеримо меньше, чем экономия на ВВ.

Таблица 17

Забойка	Масса, заряда, т	Л.н.с., м	Л.н.с/q 1/3 м/т1/3	Объем на- вала, м ³	Относитель- ный объем на- вала V/q, м ³ /т
Обычная	5	11,6	6,8	2200	440
	10	15,4	7,1	5760	576
	10	15,6	7,2	6000	600
	10	15,4	7,1	5840	584
	100	30,9	6,7	45 000	450
Комбини-	7	13,2	6,9	7960	1140
рованная	10	15,5	7,1	11 750	1170
	83	28,1	6,5	54 000	650

2.6.2. Подобие при взрывах на склонах

Для изучения масштабного еффекта при вэрывах на склонах (на сброс) были проведены опыты с зарядами различной массы. В качестве основного параметра, по которому оценивается масштабный еффект, используется сбъем сброшенной породы. Для количественной оценки показателя подобия можно использовать данные, приведенные на рис. 45. Из них видно, что точки, относящиеся к взрывам с комбинпрованной забойкой, могут быть описаны формулой

 $V_{\rm g} = 2 \cdot 10^3 \, \varrho^{0,75} \,, \tag{19}$

где V - объем навала, м³; Q - масса заряда, т.

Результаты вэрывов с обычной забойкой характеризуются более спожной зависимостью. Если представлять зависимость объема навала от массы заряда в виде $V_{\rm H} \sim Q^m$, то значение *m*, как видно на рис. 45, не остается постоянным. Так, в целом для зарядов массой от 5 до 100 т величина *m* близка к 1. Если определять показатель подобия в интервале *Q* от 10 до 100 т, то *m* получается около 0,9. В интервале от 5 до 10 т значение *m* несколько больше 1. Учитывая, что в среднем величина *m* близка к единице, можно было бы говорить о соблюдении геометрического подобия, но поскольку показатель подобия обнаруживает закономерную тенденцию к изменению, а качество забойки влияет на еффект выброса породы, то вопрос о подобии при взрывах с обычной забойкой требует более внимательного рассмотрения.

По существу, взрывы разного масштаба с обычной забойкой, когда наблюдается выход продуктов детонации из полости через устье 97

13-1





(ушелья), в то время как длина навала – его размер в перпендикулярном направлении. Опытные вэрывы проводились в условиях, когда противоположный борт ущелья отсутствовал, т.е. в этих опытах порода укладывалась на горизонтальную полку. Поэтому длина навала в них определялась кинематическими параметрами породы и является максимально возможной. При наличии противоположного склона дальность развала породы уменьшается.

На рис. 47 приведен график, характеризующий распределение породы в навале по его ширине. На горизонтальной оси отложена ширина некоторой полосы вблизи оси навала. Последняя определяется

пинией, проходящей через точку выхода л.н.с. и эпицентр вЗрыва. По вертикальной оси отложен объем породы, заключенный в пределах указанной полосы. В соответствии с установленным выше критерием подобия все размеры относятся к массе заряда в соответствующей степени. Поскольку максимальный эффект вэрыва наблюдается с комбинированной забойкой, то все дальнейшее рассмотрение результатов проводится применительно к таким вэрывам.

Из рис. 47 видно, что точки, относящиеся к вэрывам зарядов массой 7, 10 и 83 т. могут быть удовлетворительно описаны единой кривой, которая имеет монотонный харахтер. Ее наклон характеризует высоту навала породы или площадь осевого сечения навала. Максимальная высота наблюдается вблизи оси навала и постепенно убывает к его краям. Основная часть породы распределяется в пределах полосы, равной 35 - 50 м/т^{1/4}. Внутри нее заключено примерно 90 - 95% всей породы. На рис. 47 наряду с данными опытных взрывов приведены также результаты правобережного взрыва в Медео. Относительный объем породы вблизи оси навала при взрые в Медео оказался примерно таким же, как и при опытных взрыва бал. Заметная разница наблюдается на краях навала, где для взрыва Ледео объем породы больше. Такое перераспределение породы в

пе связано, по всей вероятности, с действием продуктов взрыпее соорываясь по подводящим выработкам, они разбрасывают пороных в тороны от оси навапа. На возможность такого объяснения укаиспольз сравнение распределения породы в навале при опытных взрыгрупповы за массой 83 т с комбинированной забойкой и массой 100 т пось по разабойкой (рис. 48). Для характеристики навала в разлизэту трудностя взято содержание породы в пределах полосы шириной 10 м. По горизонтальной оси отложено расстояние таких полос от оси навала, а по вертикальной оси – объем породы в пределах этих полос. Поскольку ширина полосы все вреия бралась постоянной, то рязанные объемы пропорциокальны площадям соответствуюцах сечений навала (или средям высотам навала).

Из рис. 45 видно, что для карыва 100-тонного заряда на кривой распределения поролы по ширине имеется миникум, положение которого принерко совпадает с местона-



Рис. 48. Распределение породы в навале по его ширяне при ворывах зарядов массой 83 т (1) и 100т(2) соответственно с комбинированной и обычной забойками

акидением подводящей штольни. Образование етого минимума, очевиде но, связаво с разбрасыванием породы газами, вытекавшими из котповой полости.

Приведенные результаты означают, что истечение газов по подводящим выработкам не только снажает объем выброшенной породы, во в заметным образом изменяет ее распределение. Разбрасывая породу в стороны, продукты взрыва увеличивают ширину развала и сникают максимальную высоту по оси навала. В большинстве случаев эти факторы являются отрицательными, и для устранения их необходимо применять комбинированную забойку.

Распределение сброшенной породы по длине навала показано на мс.49. По горизонтальной оси отложено относительное расстояние от заряда вдоль оси навала до соответствующей плоскости сечения, по вертикальной оси – относительный сбъем сброшенной породы, который расположен между зарядом и давной плоскостью сечения. Из мсунка видно, что: данные опытных взрывов могут быть описаны едной кривой. Относительное расстояние от заряда до границы намла породы вдоль оси составляет около 50 м/г⁰, 25. Напомним, то это расстояние характеризует распределение породы при ее сбрасывании на горизонтальную поверхность.

На рис. 49 приведены также результаты для правобережного вэрыва Медео. Распределение породы по длине навала для этого взрына заметно отличается от кривой для опытных взрывов. На білизких расстояннях объем породы относительно меньше, а на дальних – заметно больше. Кроме этого, максимальная дальность развала пороны в Медео, как видно из рис. 49, составляет приблизительно 33 м/т0,25, что в 1,5 раза меньше, чем в опытных вэрывах. Укаавные особенност: распределения породы в Медео являются весьма карактерными. Тот факт, что на малых расстояниях при этом взрыве оказалось относительно мало породы, по всей вероятности, отракает масштабный еффект. При опытных взрывах значительная часть вороды оставалась на склоне вблизи края воронки выброса (см.



Рис. 49. Зависимость приведенного объема навала от приведенного расстояния при взрыве зарядов массой: 1 - 7 т; 2 - 10 т; 3 - 83 т; 4 -5290 т.

рис. 42), Масса ве оказыва. ется недостаточной для того, чтобы она начала двигаться вдоль склона под действием силы тяжести. С возрастани.. ем массы зарядов до нескольких тысяч тонн (взрыв в Медео) эффект обрушения породы со склона под действием силы тяжести, очевидно, возрастает, и такое обрушение становится возможным в больших масштабах,

Вторая особенность навала в Медео – уменьшение его длины – обусповлена наличием противоположного склона. В связи с втим становится очевидным, что распределение породы по длине навала является менее определенным, чем распределение по имрине. Оно зависит как от крутизны

вэрываемого склона и масштаба взрыва, так и от конфигурации поверхности, на которую укладывается порода. В связи с этим и высота навала должна обнаруживать такую же неопределенность. Трудно надеяться, что удастся достигнуть детального расчета высоты навала, поскольку распределение породы по его длине определяется не только первоначальной дальностью баллистического разлета породы, но я ее последующим движением путем сдвига или качения вдоль навала. То, что такое движение имеет место, видно из распределения породы на первоначальной поверхв опытных взрывах. Особенности рельефа ности, куда пожится взорванная порода, на поверхности навала не прослеживаются; поверхность навала оказывается относительно гладкоя, что можно рассматривать как доказательство существования подвижек породы после ее баллистического разлета. По-видимому, наиболее вадежной характеристикой высоты навала является ее среднее значение по данному сечению. Для определения средней плошади осевого сечения навала можно воспользоваться графиком на рис, 47. Еспи разделить объем породы вблизи некоторой полосы, расположенной около оси навала, на ширину этой полосы, то как раз получится плошадь сечения. Относительная средняя плошадь осевого сечения навапа равна 70 м2/т0,5

2.6.4. Направленность броска породы

Взрывы на склонах предназначены в основном для перемещения породы и укладки ее в пределы контура строящегося сооружения. По-102 этому направленность перемещения породы при взрыве имеет сущест-

В практике использования взрывов широко распространено представление о его направленном действии, основанное на теоретичесим разработках Г.И. Покровского [43, 44], Согласно этим представлениям, направленность действия взрыва может регулироваться с ромошью искусственных плоскостей обнажения, которые создаются в результате предварительных взрывов. В целом перемещение породы при этом осуществляется массовыми взрывами, при которых часть зарядов (первый ряд) взрывается в первую очередь, а последующие заряды взрываются с интервалами замедления и работают на плосдость обнажения, созданную первыми взрывами. Наличие эффекта подосно обнажения, созданную первыми взрывами. Наличие эффекта повается применительно к жидкости, экспериментально этот вфект прорерялся на слабосвязанном грунте типа песка. Возможность использовния этих представлений при взрывах в крепких скальных породах требует экспериментальной проверки.

На основании результатов опытных вэрывов такая проверка может быть осуществлена. Методика проверки состоит в спедующем. За основу принимается вэрыв сосредоточенного заряда, при котором весь ефект направленного перемещения породы определяется естественным слоном. С ним сравниваются результаты групповых вэрывов, в которых первый ряд зарядов вэрывался мгновенно, а второй ряд – с зажедлением. Эффект дополнительного направленного действия групповых вэрывов должен проявиться в том, что на оси навала при этих вэрывах должно быть относительно больше породы, чем при взрыве слиничных зарядов.

На рис. 50 приведены данные по одиночным и групповым взрыым. По горизонтальной оси отложена относительная ширина полосы жоло оси навала, по вертикальной оси - объем породы в пределах этой полосы, отнесенный к общему объему навала. Из рисунка видво, что точки как одиночных, так и групповых взрывов лежат на одвой кривой. Если бы при групповых взрывах была большая направлеяность перемещения породы, то точки, соответствующие втим взрыам, при малых значениях $\Delta/q^{0,25}$ располагались бы выше, чем тон одиночных варывах, т.е. относительная ширина навала была бы меньше. Поскольку втого не наблюдается, то нельзя и говорить об мучшении направленности перемещения породы при групповых взры-28х по сравнению с одиночными. Физически этот результат можно выяснить следующим образом. В крепких породах малая по площаан свободная поверхность, создаваемая предварительными взрывами, ^{ве может} эффективно направлять движение породы из-за наличия зна-Жальных сил сопротивления, которые возникают в породе при Появлении такого движения. Основным направляющим фактором в креиних породах является, очевидно, поверхность естественного склона, Reзависимо от расположения и порядка вэрывания зарядов.



Рис. 50. Зависимость относительного объема навала от приведенной ширины при одиночных и групповых варывах с обычной забойкой: 1-одиночный вэрыв заряда массой 10 т; 2-5 - групповые вэрывы зарядов массой 14; 17,3; 17,9; 12,6 т; 6 - одиночный вэрыв заряда массой 5 т

2.6.5. О методике расчета вэрывов на склоне

Результаты опытных вэрывов позволяют высказать некоторые соображения о методике расчета вэрывов на склоне, используемых для создания завальных плотин. Их основой являются приведенные выше експериментальные зависимости, установленные для основных параметров навала породы. Поэтому и применимость предлагаемых рекомендаций по методике ограничена усповиями, в которых эти зависимости были получены: углы склонов должны составлять 30 - 40°, а вэрывы необходимо проводить с комбинированной забойкой.

При проектировании плотины исходными характеристиками являются высота плотины, объем ее тела и ширина по основанию. Поскольку поперечный разрез ущелья, в котором возводится плотина, известен, то требование спределенной высоты однозначно определяет и площадь сечения тела плотины по ее оси. Определение массы вэрывчатых материалов, необходимых для создания заданной плотины, можно производить по различным ее параметрам, используя приведенные выше экспериментальные зависимости.

Если заряд ВВ является сосредоточенным, то все параметры связаны между собой в достаточно определения по одному из трех параметров. Однако в практике встречаются иногда такие профили плотин, которые не могут быть обеспечены взрывом одного заряда. В этом случае ВВ необходимо располагать в виде серин зарядов вдоль склона. При этом масса наибольшего заряда определяется требуемой площадью осевого сечения плотины (ее высотой). Относительная площадь осевого сачения плотины, как было показаво выше, равна 70 м²/т⁰, 5. Если обозначить эту площадь через 5, а массу заряда, который в состоянии обеспечить навал породы с заданным значением сачения, через Q, то получается формула аля определения массы заряда в виде

$$Q = \left(\frac{S}{70}\right)^2$$
.

Подставив полученное значение в формулу (19), получим объем навала породы. По рис, 47 определим ширину навала вдопь ущелья при данной массе заряда. Основная масса породы (около 90%); согласно этому графику, укладывается в пределах полосы шириной 35 – 40 м/т⁰,25, т.е. при массе заряда о получим

 $\Delta = (35 \pm 40)^{\circ} Q^{0,25}$

(21)

те \Lambda - ширина навала, м.

Результаты сравнения полученных значений объема и ширины навала с заданными параметрами плотины являются критернем, по когорому решается вопрос о необходимости дополнительных зарядов.

Предпагаемый способ расчета массы заряда применим в тех спучаях, когда основная · часть навала определяется объемом сброшенной взрывом породы. При угле склона около 40° ето справедливо при зарядах массой примерно до 1000 г. При больших зарядах начинает проявляться явление оползания склона, и фактический объем навала при данной массе заряда будет больше, чем спедует из формулы (19). В этом случае предлагаемый способ оценки массы заряда будет давлъ завыщенные значения.

Выше рассмотрен вариант методики расчета вэрывов на склоне, когда определяющим параметром является максимальная илошадь сечения навала раздробленной породы. Очевидно, что такой подход не явлется исчерпывающим. Например, в ряде случаев использования энергии подземных вэрывов бывает необходимо обеспечнть такое перемечение породы, при котором была бы фиксирована максимальная дальчесть разлета породы, т.е. определяющим параметром является граны развала породы в направлении, перпендикулярном к склону. В этом случае можно наметить другую схему расчета вэрыва вблизи салона.

Пусть требуется с помощью вэрыва образовать вблизи склона навал раздробленной породы заданного объема и с определенной долустимой дальностью ее разбрасывания. В соответствии с требуемым объемом обрушения находится л.н.с., т.е. определяется место заложеямя заряда. Методика определения л.н.с. по заданному объему достаточко разработана. В основе ее лежит. допущение, что порода дробится в пределах некоторого конуса, и определенная часть ее сбрасывается вниз за пределы воронки.



Рис. 51. Схема для расчета направленного вэрыва

Примем, что максимальная дальность разлета породы L. определяется той максимальной скоростью v, которую имеет вершина поднимающегося купола (рис. 51). Тогда вертикальная и горизонтальная составляющие этой скорости составят

$$v_{\rm p} = v \sin \alpha; \quad v_{\rm p} = v \cos \alpha, \tag{22}$$

где а - угол наклона свободной поверхности. Дальность полета L определяется по формуле

$$L = v_{\rm p} t_{\rm q} , \qquad (23)$$

где t_{Π} - время полета куска, равное $t_1 + t_2$; t_1 - время подъема куска на высоту H; t_2 - время падения с высоты H + h.

При этом высота ¹, являющаяся превышением точки падения куска над точкой вылета, может быть как положительной, так и отрицательной величиной

$$t_{1} = \frac{v_{B}}{g}; \quad H = \frac{v_{B_{1}}^{2}}{2g};$$

$$t_{2} = \sqrt{\frac{2(H+h)}{g}},$$
(24)

Отсюда получаем спедующее выражение:

$$L = v \cos \alpha \left[\frac{v \sin \alpha}{g} + \sqrt{\frac{2}{g} \left(\frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2 g} + h \right)} \right].$$
(25)

Эта формула дает связь между дальностью полета куска, и скоростью его вылета с поверхности склона. При ее выводе сопротивление воздуха не учитывалось, поскольку вэрывы на сброс проводятся 106 обычно при таких л.н.с., когда скорости сравнительно маны. В случае необходимости сопротивление воздуха легко может быть учтено [44, 76].

Итак, исходя из требуемого значения L по формуле (25), находится скорость, в качестве которой наиболее целесообразно принять максималькую скорость движения вершины купопа. Чтобы замкнуть схему расчета массы заряда, необходимо найти завесямость этой скорости от массы заряда и л.н.с. Для втого воспользуемся данными измерения кинематичесих параметров при опытных взрывах. На рис. 52 приведена зависимость максимальных скоростей (м/с) движения отдельных точек поверхности склона от приведенного расстояния этих точек до центра заряда, которую можно аппроксимировать следующей формулой:

$$v = 7,6 \left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^3$$
. (26)



Рис. 52. Зависимость максимальной скорости движения отдельных точек поверхности купола (до момента прорыва его газами) от приведенного расстояния

Окончательную формулу для определения массы заряда получим из формулы (26), если разрешим ее относительно массы заряда и подставим скорость, определенную по формуле (25).

Спедует отметить, что точки на рис. 52 относятся к взрывам комбинированной (1) и обычной (2) забойками. Какого-либо системапического расхождения между ними установить не удалось. Как отмечалось выше, этот факт связан с тем, что движение основной массы породы создается волной сжатия, интенсивность которой слабо зависят от типа забойки. Вместе с тем, как видно из рис. 52, разброс точек довольно большой, поэтому погрешность в определения скорости по формуле (26) может достигать 50%. Соответственно это скажется и на точности определения массы заряда. Поэтому преднагаемая методика определения массы заряда по максимальной дальвости разлета породы может быть использована пишь для оценочных расчетов.

2.6.6. Влияние интервалов замедления на пействие взрывов вблизи свободной поверхности

Промышленные варывы довольно часто проводятся в таких усло-^{видх}, когда ВВ располагается в отдельных камерах. Эти условия на-

2436
вболее характерны для крупных вэрьвов, как, например, вэрывы в Медео или Байпазинский вэрыв. При расположении зарядов в отдельных камерах их вэрывание, как правило, проводится разновременно. Интервалы замедления при этом выбирают из условия снижения сейсма. ческого эффекта или в целях создания направленного действия вэрыва отдельных зарядов. В зависимости от требуемого эффекта интервалы колеблются от десятков миллисекуна до нескольких секуна.

Режим выделения вэрывной энергии имеет существенное эначение для эффективности вэрыва в целом [16, 56, 71]. Поэтому рассредоточение энергии вэрыва в пространстве и во времени оказывает влияние на суммарный эффект вэрывов на выброс и на сброс. Хотя короткозамедленное вэрывание и применяется довольно широко для самых различных целей, вопрос о влиянии разновременности вэрывания на эффект выброса далеко не ясен. Для изучения этого вопроса, помнио данных о вэрывах на склоне, была проведена также специальная серия опытных вэрывов на выброс. Опыты проводили в сухом лёссовидном суглинке со следующими характеристиками: плотность 1,8 г/см³, скорость продольных воли 300 – 330 м/с, показатель простреливаемости 200 п/кг. Котлы для размещения зарядов ВВ создавались путем прострела скважие диаметром 50 мм.

Для определения оптимальных условий заложения зарядов, обеспечивающих максимальные размеры воронки, была проведена вначале серия одиночных вэрывов с зарядами массой 8 – 20 кг на различной глубине. Результаты опытов приведены на рис. 53. Наибольший объем воровки для данных условий проведения опытов наблюдается при заглублении заряда (5 – 8) м/т1/3.

Ропь интервалов замедления изучалась на примере парных взрывов. Оба заряда размещались на подинаковой глубине, Было провелено две серии таких взрывов. В первой из них заряды имели разную массу: 15 и 5 кг. Они размещались на глубине 1,7 м при расстояния между ними 1,0 - 1,2 м. Вначале производился взрыв большого заряда, в затем через определенный интервал времени - малого заряда. Во второй серии опытов масса зарядов была одинаковой (8 кг) и они закладывались на глубину 2 м при том же расстоянии между ними.

Задержка момента времени подрыва второго заряда (замедление)



Рис. 53. Зависимость приведенного объема воронки от приведенной глубины запожение заряда

осуществлялась двумя способамя. Для малых интервалов задержки (5 - 20 мс) было создано спеинальное устройство, которое выдавало напряжение 24 В с заданным интервалом. Контроль длительности интервалов производился на осщиллографе с точностью не менее 5%. Это устройство в принципе позволяет создавать и большие замедления, однако для упрощения условий опытов замедления в 25-100 мс производились с помощью



Рис. 54. Влияние интервала замедления на объем воронки при парных взрывах зарядов массой:

8-15 8 5 KT; 6-8 8 8 KT

канскопей замедленного действия. В опытах осуществлялся независимый контроль подрыва зарядов с помощью специальных сейсмическия датчиков, которые устанавливались в непосредственной близости от взрыва.

В результате парных вэрывов при указанных расстояниях между зарядами получаются воронки с хорошей осевой симметрией. Размеры воронок измерялись по двум профилям: вдоль линии расположения зарядов и в перпендикулярном направлении. Объем воронки вычислялся по среднему профилю.

Результаты опытов с парныма взрывама по двум сердам приведены на рис. 54. Точки и на вертикальной оси при $t_3 = 0$ соответствуют одновременному взрыву зарядов. Из рисунка видно, что в обеих сериях объем воронки получается максимальным при мтновенном взрывенни. Замедление взрыва второго заряда ведет к снижению общего ефекта выброса. И хотя точки на рис. 54 лежат с довольно значительным разбросом, общая тенденция уменьшения объема воронки с Увеличением интервала замедления не вызывает сомнений: при интервале замедления около 100 мс объем воронки уменьшается в 1,5 – 2,0 раза.

Кроме описанных выше опытов в суглинке были проведены также вэрывы в крепких скальных породах (в гранитах). Эти опыты проводились в 1969 г. в районе ущелья, где в последующем была проведена первая серия специальных опытных вэрывов [54]. При етом использовались камерные заряды массой 5 - 10 т, которые закладывались в массив породы через горизонтальные штольни. Взрывы провоакиесь вблизи наклонной свободной поверхности с углом склона окопо 30°. На рис. 55 приведена схема размещения зарядов при этих взрывах, а в табл.18 - основные параметры.

Первоначально были взорваны заряды № 1 н 2, а с интервалом 2 с - все остальные (№ 3 - 6).



Рис. 55. Схема расположения штолен зарядов и контуров видимых воронох при взрывах в крепких скальных породах

Таблица 18

Номер што ни	ль.Номер заря да	- Масса заряда, т	Л.н.с., м	Интервал за- медления, с
1	1	5	10,5	0
1	2	5	10	0
1	3	10	17	2
2	4	5	9,5	2
2	5	5	12	2
2	β	10	16	2

Из табл. 18 видно, что заряды первого и второго рядов в штольне № 1 вэрывались с интервалом замедления, в то время как в штольне № 2 - мгновенно оба ряда.

На рис. 55 приведены контуры видимых воронок. В случае мгновенного вэрыва обоих рядов получилась видимая воронка объемом 4700 м³. Интервал замедления, равной 2 с, в штольне № 1 привел к уменьшению объема до 1700 м³. При этом, правда, следует заметить, что обе воронки расположены так близко между собой, что частично перекрывают друг друга. Это связано с тем, что взрывы проводниись в основном для получения раздробленного камня, а не специально для исследовательских целей. Учитывая порядок взрывания, часть воронки от взрыва зарядов в штольне № 1 была засыпа-110 на породой от взрыва в штопьне № 2. Однако это перекрытие было несущественным.

Результаты опытных вэрывов, особенно второй серии, также могут быть использованы для оценки влияния интервалов замедления. Из табл. 11, 14 и 16 видно, что объем навала породы в пересчете на 1 т ВВ при групповых вэрывах с мгновенным вэрыванием оказывается примерно таким же, что и при взрывах одиночных зарядов с обычной забойкой. Эти данные согласуются с результатом, приведенным на рис. 5 для взрывов на выброс в грунтах. Замедление ввоанпось в трех опытах. В опыте № 6 (см. табл. 14) интервал замедления получился равным 0,1 с, что фактически вквивалентно мгновенкому вэрыванию. В опытах № 7 и 8 интервал замедления состаанл 2 н 1 с. Относительный объем навала в опыте № 7 равен 640 м³/т. что примерно соответствует объему при одиночных взрывах или групповых взрывах с мгновенным взрыванием. В опыте № 8 при интервале замедления 1 с относительный объем навала равен 350 м³/т, т.е. заметно снизился по сравнению с объемом при мгновенном вэрывании, Следует заметить, что в опыте № 7 породы были относительно слабые, на что, в частности, указывает практическа полное отсутствие свежих граней на кусках в навале породы и желтоватая окраска всего навала, свидетельствующая о наличии глинистых отложений в трещинах массива. Если судить по совокупности данных. полученных во второй серии опытных взрывов на склоне, то и они, вслед за приведенными выше результатами, свядетельствуют об оспаблении действия групповых зарядов при разновременном вэрывании зарядов в группе.

Таким образом, результаты всех опытов, в которых изучалось влияние интервалов замедления, качественно согласуются между собой. Рассредоточение выделения энергии взрыва во времени приволыт к снижению вффекта выброса породы. С физической точки эрения этот результат представляется понятным; Действительно, взаимодействне двух (или более) взрывов в конечном счете сводится к вопросу о суммировании внергий движения, сообщаемых втими вэрывами окружающей среде. И естественно, что накбольший вффект такого спожения будет тогда, когда оно происходит в фазах максимальных значення энергия (скоростея), сообщаемых среде каждым отдельным вэрывом. Разновременность вэрывания приводит к сдвигу фаз напожения, что означает уменьшение максимального значения суммарной элергии движения. И если при мгновенном вэрывании в некоторых точках выбрасываемой среды, где усповия выброса были близки к критическим, обеспечивался выброс, то некоторое снижение суммарвой энергин в этих точках сделает выброс невозможным, в результате чего общий объем выброса уменьшится.

Попученный результат не согласуется с данными работ [16, 71,]. в которых отмечается обратный эффект. Это расхождение может быть обусповлено различиями в условиях проведения опытов: в работе [71] всследовалось взаимодействие рядов зарядов при относительно больтом расстоянии между рядами, а в работе [16] описаны опыты, когпа заряды располагались на разных глубинах друг над. другом.

111

×

Приведенные результаты показывают, что вопросы взаимодействия отдельных зарядов являются сложными и определяются многими факторами. Учитывая зависимость еффектов взаимодействия от интервалов замедления, которые могут изменять результаты вэрыва в 1,5 – 2,0 раза, при составлении технических проектов использования подземных взрывов разновременность вэрывания отдельных зарядов следует оцеиквать не только с точки зрения его влияния на сейсмический эффект и направленность действия, но и в смысле общего эффекта выблоста.

2.6.7. Влияние угла склона на объем навала породы

Расположение свободной поверхности играет существенную роль в общем процессе развития взрыва. При взрыве на выброс, когда ета поверхность горизонтальна, условия для перемещения взорванной по- ' роды являются наиболее неблагоприятными, поскольку направление скпы тяжести противоположно направлению перемещения центра тяжести поднимаемого взрывом объема породы. При взрывах на склонах скпа тижести уже действует под некоторым углом, и за счет этого фактора условие выброса породы облегчается, а объем сброшенной породы увеличивается. С увеличением крутизны склона этот объем должен также расти. Опыт действительно свидетельствует в пользу этого заключения. Так, например, при правобережном взрыве в Медео, гле угол склона составляя 40 - 45°, относительный объем сброшенной



Рис. 56. Зависимость приведенного объема навала породы от угла склона:

1,2-варнанты интерполяции опытных данных

породы составил 300 м³/т, в то время как в Байпазах при угле склона 60° он достигал 700 м³/т.

Чтобы установить количественную связь между объемом сброшенной породы и углом склона, необходимо кметь данные о вэрыве одного и того же заряда вблизи склонов различной крутизны. Таких данных в настоящее время нет. Однако можно воспользоваться результатами вэрывов разной мощности, приведя их по определенному показателю подобия к одной массе заряда. Выше было показано, что для вэрывов на склонах в случае исключения выхода газов по штопьням наиболее вероятна пропорциональность объема породы массе заряда в степени 0,75, Именно этот показатель подобня и будет использовая в последующем анализе

Таблица 19

Показатели			Варыві	19		
		OIIbIT HIBIE		Бурлыкия	Байлазы	Правобережный в Медео
Общая масса заряда, т	2	10	83	200	1854	5293
Объем сброшенной породы, м ³	8000	11750	54.10 ³	(4-5)10 ⁵	(1,5-1,9) 10 ⁶	1,5 . 10 ⁶
Приведенный объем V _R /q ⁰ ,75	1860	2100	1960	2900-	5300	2500
Угоп склона а, градус	40-45	40-45	40-45	40-45	60	40-45
Угол склона после вэрыва а ₀ , градус	35	35	30	30-32	25-30	00

15-1

113

ţ

данных. Его применение здесь оправдано еще к тем, что для анализа будут использованы в основном крупные взрывы зарядов массой 1000 г. для которых выход газов по подводящим выработкам не имеет существенного влияния на объем сброшенной породы.

Основные параметры вэрывов, которые использованы при рассмотрении влияния угла склона, приведены в табл. 19. Зависимость приведенного объема сброшенной породы от угла склона показана на рис. 56. Наряду с данными о вэрывах на склонах на этом рисунке приведен также объем выброшенной породы при вэрыве на выброс, когда угол склона равен нулю. Поскольку примых данных об этом объеме нет, то его определяем по объему воронки. В скальных породах, где показатель прострепа мал, в первом приближении -можно считать, что объем воронки определяется выбросом породы.

Из рис. 56 видно, что зависимость объема сброшенной породы от угла может быть представлена в виде монотойного графика. Следует, правда, отметить, что в интервале углов О – 35° данные отсутствуют. Повтому на этом участке характер зависимости может отклоняться от монотонности. Можно, например, представить, что при малых углах наклона объем выброса не увеличивается, поскольку порода вблизи верхнего края воронки падает обратно в воронку. Возможный ход зависимости, не являющейся монотонной, показан на рис. 56 пунктирными линиями (2) и может быть аппроксимирован двумя отрезками прямых линий. Однако это маловероятно.

Несомненным представляется тот факт, что влияние угла склона зависит от его величины. Особенно резкое возрастание объема видно при углах свыше 40°. Так, при изменении угла от 40 до 60° объем сброшенной породы увеличивается примерно в 3 раза. Относительный объем породы, выбрасываемой из воронки при взрыве на выброс



Рис. 57. Схема пабораторных опытов

(угол склона равен нулю), как вклю из рис. 56, составляет примерно 300 м³/г⁰,75. Объем при взрыве на склоне мокет увеличиваться как за счет увеличиваться как за счет увеличния объема выброса из воронки, так и в результате воспедующего оползания разрушенной породы под действием силы тяжести.

Чтобы пучше понять мехавизм образования навала породы при взрывах на склоне, рассмотрим результаты простых набораторных опытов, в которых всспедовалось обрушение склона. Схема опытов показана на рис. 57, а ч б. В прямоугольный ящик 1 насыпают суха песок и накрывают крышкой



Secon



2. После етого ящик наклоняют так, что свободная поверхность песка образует с горизонталью угол а., При быстром сиятии крышки песок 3 из ящика частично высыпается, а свободная поверхность в ящии в яменяет свое положение (см. рис. 57). Угол a_0 , меньший угма a, соответствует углу естественного откоса.

На рис. 58 приведена зависимость объема песка, высыпающегося и ящика, от угла наклона а. Как и следовало ожидать, эта заисямость пересекает горизонтальную ось при угле, близком к углу истественного откоса. В общем виде зависимость объема обрушения и от угла склона и . как видно из рис. 58, должна иметь вид

 $V_{\rm H} = K \, tg \, (\, \alpha \sim \alpha_0),$

Пе ао - угол естественного откоса; К - постоянный ковффициент. На участке до 60 - 65° ета зависимость, как видно из рис. 58, с корошей точностью может быть аппроксимирована прямой линией. Именно этот участок для нас представляет наибольший интерес, поскольку в этом интервале лежат углы склонов, на которых произвомансь взрывы (см. табл. 20).

Вернемся теперь снова к результатам вэрывов на склоне. Предпопоким, что при увеличении угла склона объем породы, которая непосредственно выбрасывается из норонки за счет начального запаса инетической энергии, существенно не изменяется. Тогда, как видно на рис. 56, спедует допустить, что основной вффект сброса опредешется оползанием породы. В этом случае, очевидно, через точки напо провести прямую линию, которая должна пересачь горизонтальную ось при угле естественного откоса раздробленной породы. Как видно на рис. 56, этот угол равен 30 - 35°.



Рис. 59. Результат действия варыва на склоне:

 положение склона до взрыва;
 положение склона после взрыва;
 граница истинной воронки после уборки породы; 4 – заряд ВВ Фактическое значение утла естественного откоса можно определить по результатам маркшейдерской съемки склона на участках воронки, где раздробленная порода распределяется в соответствии с действием сипы тяжести. Значения этих углов приведены в табл. 20 в последней строчке. Они примерно совпадают с тем значением, которое получено из рис. 56. Это совпадение свидетельствует в пользу

непротиворечивости сделанного выше предположения об определяющем эначении процесса сползания раздробленной породы при больших углах склонов (более 40⁰).

Оценим теперь объемы породы, которые могут обрушиться под действием силы тяжести. Будем исходить из того, что взрыв производит дробление массива в пределах некоторого объема. О форме и размерах этого объема можно судить на основании работы [36], в которой приведены результаты взрыва зарида массой 10 т (рис. 59). Разрушенная при етом взрыве порода после взрыва была частично убрана, что позволило оденить размеры истинной воронки, т.е. того объема, в пределах которого произошло дробление массива. Радшус истинной воронки на уровне первоначального склона примерно равен удвоенному значению л.н.с.

Матодика определения объема обрушенной породы состоит в сле-



Рис. 60. Схема образования навала за счет высыпания породы из воронки:

 а - образование зоны раздробленной породы; б - обрушение породы; 1 - первоначальное положение склона; 2 - заряд ВВ;
 3 - граннца зоны разрушения породы; 4 - положение склона после обрушения; 5 - объем обрушения дующем. Пусть на склоне с угпом а образовалась зона разрушенной породы (рис. 60, а). Поскольку угол естественного откоса ао для нее меньше угпа а , то невзбежно произойдет се оползание: должно происходить своеобразное высылание породы из воронки на склон. Оставшаяся в воронке раздробпенная порода должна иметь угол склона ад (рис. 60,6), соответствующий углу естествевного откоса. Объем 1, который H3 B0в состоянии высыпаться ронки под действием силы тяжести, и представляет тот объем, который окажется на склоне ниже воронки и может рассматриваться как составная часть навала.

Сопоставление объемов 1 и полных объемов навала породы при реальных взрывах показывает, что эти величны одного порядка. Так, для вэрыва заряда массой 10 т на склоне с углом 40° пре ао = 30° объем 1 составляет (0,5 -1.0)104м3. Из рис. 56 видно, что фактический объем навала для такого же заряла равен (1,0 - 1,4) ± 104 м3. Это совпадение порядков величии показывает, что ход зависимости объема навала от угла, показанной на рис. 56, может быть объясная, если в качестве основного механизма образования навала считать высыпание разрушенной породы из воронки под действеем силы тяжести. И хотя приведенные оленки объема высыпающейся из ворони раздробленной породы нельзя использовать для количественного расчета объемов сброшенной породы при взрывах на скловах из-за их приближенного значения, тем не менее ето дает возможность высказать определенные соображения о способе обработки имеющихся експериментальных данных с целью установления наиболее обоснованных эмпирических зависимостей.

На основании изложенного зависимость объема навала породы от угла склона а можно искать в следующем виде:



Рис. 61. Зависимость приведенного объема навала породы от тангенса разности углов начального склона и естественного откоса разрушенной породы

 $V_{\rm H} = V_0 + K \, {\rm tg} \, (a - a_0),$

20112

где V_н - объем, который выбрасывается из воронки за счет начальной кинетической энергии при $a < a_0$; К - постоянный коеффициент.

(27)

На рис. 61 показана зависимость приведенного объема сброшенвой породы от tg (a-a₀). Угол естественного откоса a₀ принят ^{равным} 30°. Эта зависимость может быть выражена формулой вида

 $V_{\rm g} = 10^3 \rho^{0} r^{75} [0.3 + 10 \iota g'(a - 30^{\circ})], \qquad (28)$

где Q - масса заряда, т; V _н - объем навала породы, м³. Эта формула, естественно, имеет ограниченное применение. Она получена на основании довольно грубой схемы, согласно которой еффект вэрыва в основном представляется в виде дробления породы в зоне воронки с последующим сползанием этой породы под действием силы тяжести. Для углов склона 40 - 45° и более это предпо-

пожение, очевидно, допустимо. Именно для таких склонов и может быть использована формула (28). При меньших углах склона доля выброшенной породы увеличивается и для определения объема навала при взрывах на склонах с углами до 40°, повсей вероятности, пелесообразно пользоваться зависимостью, приведенной на рис. 56 (кривая 1). Для этого диалазона углов формула (28) будет, очевидно, давать заниженные значения объемов навала.

Согласно предложенной схеме образования навала породы при варывах на склонах большой крутизны должно наблюдаться соответствке межлу объемом навала и объемом 1 (рас. 60, б), который представляет по существу видимую воронку. Однако опыт не полтверждает такого соответствия. Как правило, объем видимой воронки при варывах на склонах намного меньше объема навала. По-вилимому, это несоответствие объясняется тем. что оползанию полвержена не только раздробленная порода внутри воронки, но и некоторый поверхностный слой склона, расположенный выше воронки. Это особенно наглядно видно на крутых склонах [59], где этот слой полностью обрушается вина. При углах 40 - 45° полного оползания не происходит. хотя гранкие оползания также четко видна [58]. Раднус зоны оползания, равный расстоянию от точки выхода п.н.с. ввеск по склону до границы обрушения, может составлять более трех п.н.с. Напомним, что раднус истинной воронки равен приблизительно лвум л.н.с. Благодаря обрушению склона выше истинной воронки происходит засыпание той се части, которая освобождается в результате сползания вниз раздробленной породы. Именно в связи с этим явлением параметры видимой воронки при взоывах на склонах оказываются крайне неустойчивыми [61]. В некоторых случаях, когда обрушение склона выше. воронки мало, объем видимой воронки может быть соизмерим с объе-МОМ НАВАЛА, В ТО ВРЕМЯ КАК ПРИ СИЛЬНОМ ОБРУШЕНИИ СКЛОНА ВИДИМАЯ воронка практически полностью может отсутствовать. Объем видямой воронки оказывается меньше объема навала еще и потому, что пои разрыхлении увеличивается объем породы,

з. ПОДОБИЕ ПРИ ВЗРЫВАХ НА ВЫБРОС И СБРОС

Вопрос о подобии вэрывов нерварывно связан с механизмом расходования енергии в процессе их развития. Под механизмом эдесь подразумевается выяснение тех статей расхода енергии, которые являются определяющими. Для вэрывов на выброс (на сброс) можно указать три таких статьи, в зависимости от роли которых будет меняться и закон подобия. Энергия: при вэрывах на выброс расходуется прежде всего на разрушение массива или его деформирование. Эта статья расходования энергии определяется тем объемом среды, в пределах которого происходит ее разрушение и деформирование. Затраты енергии в втом случае должны быть пропорциональны объему разрушаемой породы, т.е. $E \sim V$. Для разрыва заряда массой Q, у которого указанная статья расходования энергии отнимает некоторую часть Q₁, спреведливо соотношение

 $V \sim L^3 \sim Q_1, \tag{29}$

где L – пинейный размер объема разрушения (деформирования).

Еспи внергия вэрыва в основном расходуется на разрушение породы, то в этом случае объем будет пропорционален всей массе заряда, т.е. для вэрывов будет справедлив геометрический закон подобия.

Вторая статья расхода внергии вэрыва состоит в той работе, которую должен совершить вэрыв при перемещении породы в поле силы тяжести. Если представить выбрасываемый объем в виде куба со стороной L, то при выбросе такого объема, т.е. поднятия его на высоту L, должна быть совершена работа

гле И- масса поднимаемой (выбрасываемой) породы, заключенной в объеме куба со стороной L.

Значит, $A_{\rm T}$ должна быть пропорциональна L^4 . Если предположить, что к.п.д. взрыва не зависят от его масштаба, то доля энергии взрыва Q_{2} , расходуемой на выброс породы, будет удовлетворять следующему соотношению подобия:

Q:~L4.

Наконец, очевидно, что при вэрыве на выброс некоторая доля ^{вне}ргии тратится на отделение выбрасываемой породы от основного массива. В этом случае энергия расходуется на разрушение связей, а породе вдоль некоторой поверхности. Эта энергия должна быть про-

119

(30)

поранональна L². Если обозначить через Q3 долю заряда ВВ, энергия которого расколуется на отделение выбрасываемой породы от масснае, то для нее окажется справедливым следующее соотношение:

$$Q_3 \sim L^2$$
. (31)

В реальных условнях, очевнано, могут проявляться все указанные факторы. Повтому, если мы хотим получить закон подобия в общем виде, то необходимо учитывать затраты энергии по всем трем статьям. Очевидно, в атом случае соотношение подобия примет вид

$$Q = Q_1 \qquad 2 + Q_3 = AL^3 + BL^4 + CL^2. \tag{32}$$

В зависимости от коэффициентов А, В, и С средний показатель при L может изменяться от 2 до 4. В таком общем виде соотношение подобия при взрывах на выброс было предложено М.А. Садовским в А.Ф. Беляевым. Для практического использования етого соотношения необходимо знать козффициенты, надежное определение которых в настоящее время возможно топько опытным путем.

Многолетняя практика вэрывных работ показала, что главное значение в формуле (32) имеет первый член. Основной расчетной формулой для вэрывов на выброс, как отмечалось выше, является известная формула Борескова

 $Q = k h_a^3 f(n),$

где h. - глубина запожения заряда; f(n) - функция показателя выбpoca.

Пропорциональность массы заряда h свидетельствует как раз о соблюдении геометрического подобия, т.е. об определяющем значении первого чпена формулы (32).

Из структуры формулы видно, что в случае, когда для некоторого масштаба вэрывов справедлив геометрический закон подобия, третий член формулы (32) не имеет существенного значения как для этого масштаба, так в для всех вэрывов более хрупного масштаба. Существенное значение этого члена может проявиться пишь при менее крупных варывах. Учитывая, что геометрическое подобие наблюдалось на правтике уже при вэрывах зарядов массой около 1 кг, можно предположить, что пропорциональность энергии вэрыва L2, если таковая вообще где-внбудь выполняется, может иметь место лишь при очень мальох зарядах.

Применение крупных взрывов в практике взрывного дела выявело отклонение от геометрического подобия [14, 43]. Было установлено, что показатель при h, для крупных взрывов больше З.

В результате в формуле Берескова появилась поправка, физические смыся которой состоит в том, что с увеличением масштабов вэры-

(33)

ва возрастает значение второго члена формулы (32). Несмотря на очевидность приведенного физического смысла изменения закона подобия с увеличением масштаба взрыва, более :детальные исследования поспедних лет показали, что вопросы подобия снова должны привлечь к себе внимание. Можно указать, по крайней мере, два фактора, роль которых, как оказалось, существенна при обсуждении подобия взрывов разного масштаба и которые до последнего времени не учитывались.

Первым фактором является истечение продуктов взрыва из котповой полости через подводящие выработки и по трешинам в породе. Как было показано, это истечение существенно влияет на эффект взрыва на выброс, причем роль его различна при разных масштабах взрывов. Поэтому учет процесса истечения продуктов детонации вносит заметные изменения в результаты оценки масштабных эффектов,

Второй фактор касается представлений о механизме образования видимой воронки выброса. Основной причиной ее образования считается выброс породы за пределы воронки. Это представление полностью себя оправдывает при проведении вэрывов в скальных породах, где показатель прострела незначителен. Однако в случае вэрывов в груятах значительную роль в формировании видимой воронки играет котповая полость вэрыва, сбразованная при симметричном расширении продуктов взрыва, во все стороны. Объем видимой воронки можно определить по формуле

 $V = V_{\rm B} + V_{\rm T}, \tag{34}$

где V_в - объем собственно выброшенной породы; V_п - часть объема видимой воронки, которая образована за счет котловой полости.

Очевидно, что указанные составшые части видимой воронки булут по-разному меняться с изменением масштабов вэрыва. Для объема ^V_B на основании формулы (ЗО) можно вывести следующее очегчаное соотношение:

$$Q \sim L^4 \sim V_{\rm H} L.$$

Отсюда

(35)

Что же касается второй части объема видимой воровки (V_n), то она должна удовлетворять скорее геометрическому закону подобия. В результате этих различий в законах подобия с увеличением масштаба взрыва значение V_B будет расти медленнее, чем V_n . И в зави-Сплости от вклада каждой из указанных частей суммарный показатель подобля для видимой воронки будет различен. Под показателем подобия здесь и в дальнейшем подразумевается показатель степени m в формуле $V \sim q^m$, где V - объем воронки или невала. Если мы бу-

16-1

121.

дем рассматривать объем выброшенной породы, то для него должна быть справедлива формула (35). Однако для воронки выброса показатель подобия будет иметь некоторое значение в интервале 0,75-1.

З.1. Попобие вэрывов на склонах

В результате экспериментальных исследований установлено, что для вэрывов, при которых подводящие штольни забиваются раздроблевной породой (обычная забойка промышленных вэрьшов), наблюдается геометрическое подобие. Характерной особенностью этих и всех промышленных вэрьшов подобного рода является наличие интенсивного выхода газообразных продуктов детонации через подводящие штольни. Поскольку подобный выход влияет на эффект вэрыва, то в пругой серии опытов была применена комбинированная забойка с устройством в штольне бетонной пробки. Этот тип забойки обеспечии надежную герметизацию котповой полости, в результате чего прорыва газов по штольне в опытах не наблюдалось.

Наклон прямой линии на рис. 50, соответствующей вэрывам с комбинированной забойкой, дает показатель подобия, равный 0,75, т.е. весь объем сброшенной вэрывом породы пропорционален массе заряда в степени 0,75. Это значит, что для вэрывов на сброс в гранитах решающее значение в формуле (35) имеет второй чиев. Важно подчеркнуть, что определяющее значение этого члена наблюдается уже для массы заряда порядка 5 т (и более), т.е. в том диалазоне, где, согласно установившейся практике вэрывных работ, должен выполняться геометрический закон подобия.

Истечение продуктов детонации из полости взрыва приводит к снижению эффекта сброса породы. Чем больше площадь сечения канала, по которому происходит истечение, тем сильнее снижение. При взрывах разного масштаба площадь сечения подводящей штольни обычно бывает примерно одинаковой независимо от размеров зарядной камеры. Повтому относительные площади сечений оказываются различными. При малых зарядах степень снижения действия взрыва за счет истечения газов через штольню должна быть выше, чем при больших зарядах. Фактически при взрыве с обычной забойкой работает как бы не вся масса заряда Q. а только некоторая ее часть Q*

$$Q^* = p Q, \tag{36}$$

где р - коэффициент, значение которого зависит от Q .

Опыты показали, что при массе зарядов около 10 т p = 0,5. С увеличением Q значение коеффициента р приближается к единице. Данные рис. 45, если их проекстраполировать в сторону больших зарядов, показывают, что тип забойки перестает играть заметную роль (р становится равным единице) при массе зарядов в одной камере, равной 1000 т.

000

Из приведенных данных видно, что соблюдение геометрического подобия для взрывов на сброс с обычной забойкой является по су-

деству, случайным совпадением. При перасчете от одного заряда Q₁ к другому заряду Q₂>Q₁, если применять комбинированную забойку, справедливо соотношение

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{0.75} , \qquad (37)$$

где V1 и V2 - объемы породы, сброшенной взрывом.

При вэрыве с обычной забойкой вместо Q надо подставлять, согласно (36), величину Q*. Тогда получим

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_2 \ Q_2}{p_1 \ Q_1}\right)^{0,75} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{0,75} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0,75}$$

Так как p_2 всегда больше p_1 , то отношение V_2/V_1 больше $(Q_2/Q_1)^{0,75}$. Спедовательно, еспи определять показатель подобия по результатам двух взрывов зарядов массой Q_1 и Q_2 в виде

 $\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{q_2}{q_1}\right)^m,$

то для взрывов с обычной забойкой значение *m* окажется больше 0,75. В зависимости от отношения p_2/p_1 это увеличение может быть различным. Для указанных выше опытных взрывов зарядов массой от 5 до 100 т соотношение этих коэффициентов, очевидно, было таково, что показатель *m* оказался близким к единице. При меньших зарядах, если площадь сечения подводящей штольни оставить неизменной, значение *m* будет больше единицы. И тот факт, что на практике взрыввых работ с относительно небольшими зарядами (до 100 т) примерво соблюдается геометрическое подобие, является до некоторой стелени случайным явлением. Если бы техника заложения зарядов ВВ в массив горной породы позволяла обходиться выработками меньшей влощади сечения, то отклонение от геометрического подобия настутило бы при меньшей массе зарядов.

Таким образом, устранение эффекта истечения газов из полости взрыва, т.е. ликвидации потерь внергии, привело к тому, что локазатель подобия оказался равным 0,75 уже для сравнительно небольимх зарядов. Это эначит, что при вэрьшах на сброс (и, очевидно, на выброс) потери энергии на отделение выбрасываемой породы от массива и ее дробление оказываются пезначительными по сравнению с той работой, которая совершается при перемещении втой породы в поле силы тяжести. Поэтому в формуле (32) первым и третьим членами можно пренебречь. Физический смысл такого соотношения членами можно пренебречь. Физический смысл такого соотношения членами можно пренебречь. Физический и раздроблены, что на их разрушение расходуется очень мало энергии,

3.2. Подобне при взрывах на выброс в грунтах

В основу анализа вопроса о подобии вэрьнов на выброс положены данные, полученные в специальной серип опытных вэрывов зарядов массой от 100 кг до 1000 г, которые проводились в глинах [15].

На основании вывода, полученного по данным вэрывов на склоне, можно предположить, что для навала породы при вэрывах на выброс в грунтах должен быть справедлив показатель подобия, равный 0,75. Такое предположение можно сделать на том основании, что для вэрывов на выброс в грунтах тип забойки ве имеет существенного значения. Благодаря большим показателям простреливаемости при таких вэрывах подводящая к заряду выработка перекрывается даже в том случае, когда она инчем не забивается [15]. Продукты детонации прорываются в атмосферу через разрушенный купол грунта уже после своей активной стадии расширения, в течение которой они совершают работу.

Как известно, навал грунта при вэрывах на выброс имеет симметрию. Поэтому по одному-двум сечениям навала можно подсчитать его объем. По профилям свободной поверхности до и после вэрыва, приведенным в работе [15], таким способом были определены объемы навалов при различных по мощности вэрывах. Предполагалось, что весь объем, заключенный между поверхностью навала и уровнем свободной поверхности до вэрьша, характеризует объем навала. В действительности объем навала меньше, так как выброшенный грунт пожится на деформированную (приподнятую) в процессе развития купола поверхность замли.

На рис. 62 приведена зависимость объема навала грунта от массы заряда (пиния 1). Все точки, соответствующие массе заряда 0,1; 1; 10 и 1000 т, практически пежат на одной прямой, что свидетепьствует о постоянстве показателя подобия во всем указанном диапазоне массы зарядов. Нак-



(1) и видимон воронки (2) от массы заряда при взрывах на выброс в грунтах 124 пазыке массы зарядол на пон пинии 1 дает показатель подобия, равный 0,91. Такой же показатель дает и пиния 2, которая соответствует объему видимой воронки выброса,

Устойчивость показателя подобия при различной массе заряда не подтверждает существующего представления о том, что с увеличением масштаба вэрыва роль силы тяжести возрастает, и поэтому показатель подобия уменьшается. Вместе с тем значение показателя заметно больше 0,75. Из этого факта можно заключить, что в формуле (35) для вэрывов в грунтах существенное значение играет не только второй, но и первый чпен. Однако в этом случае показатель подобия должен был бы непрерывно уменьшаться с увеличением массы заряда. Действительно, предположим, что при некотором масштабе зарядов массой Q_1 справедливо геометрическое подобие, т.е. $Q_1 = AL_1^2$. Для другого

заряда массой Q2 второй член нельзя выбрасывать и для него будет справедливо равенство

$$Q_2 = AL_2^3 + BL_2^4$$
.

Из втих двух равенств следует

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \frac{1}{1+k L_2} = \frac{Q_2}{Q_1} f(L_2) \sim (\frac{Q_2}{Q_1})^m,$$

где k - некоторый постоянный коэффициент,

Так как *(L)* с увеличением L непрерывно убывает, то и показатель подобия *m* должен убывать (начиная с единицы). В действительности же, как видно из рис.67, этого не наблюдается, несмотря на значительность диапазона изменения масштабов взрыва.

Чтобы объяснить устойчивость показателя подобия, необходимо вредставить объем видимой воронки (или навала грунта) в виде двух частей, как ето следует из формулы (37), которую легко преобразовать к следующему виду:

$$V = a Q + b Q^{0,75}$$
(38)

те у- сбъем видимой воронки.

2436

Первый член (a Q) представляет ту часть видимой воронки, которая образована за счет котповой полости. Второй член (b Q)^{0,75} царактеризует собственно объем выброшенного грунта. Если теперь чриравнять сумму втих двух членов с разными показателями подобия векоторому одночлену типа Q^m , т.е.

 $V = aO + bO^{0,75} = Q^{m} , \qquad (39)$

10 путем подбора коэффициентов а и в можно обеспечить примервсе постоянство показателя m в значительном диалазоне изменения Q

Коэфициенты а и b имеют очевидный физический смысл. Первый из них должен представлять величину, близкую по порядку величины к показателю простреливаемости грунта, а b - объем истинвого навала породы для единичного заряда, разделенный на показатель рыхления (т.е. объем воронки выброса).

Значения втих ковффициентов были определены на основании опыт-

ных данных (линия 2 на рис. 62). В результате для воронки выб-

 $V = 0,21Q + 0,93Q^{0,75},$ (40)

где Q - масса заряда, кг; V - объем грунта, м³.

Значение коэффициента a = 0,21 м³/кг составляет примерно 0,85 показателя простреливаемости, который для исследуемых грунтов равен в среднем 0,25 м³/кг [15]. Такое соотношение представляется очевидным, если учесть механизм образования видимой воронки. Первоначальная форма видимой воронки хорошо наблюдается при вэрывах иебольшого масштаба в пластичной среде (см. рис. 18). При вэрывах в реальных грунтах форма воронки, представленная на рис. 18, имеет место как некоторая промежуточная стадия, которую можно было бы наблюдать сразу после раскрытия купола. Потом крутые борта оподают и воронка приобретает характерную чашеобразную форму. Однако и при реальных взрывах, в которых изучался разлет грунта с помощью специальных индикаторов [66], видно (см. рис. 20), что основная часть объема котловой полости действительно входит как составная часть в объем видимой воронки, хотя потом и оказывается засыпанной оползшим грунтом.

Сравним теперь значение второго коэффициента b с объемом видимой воронки при взрывах в скальных породах. Поскольку показатель простреливаемости в таких породах мал, то основная часть видимой воронки должна спределяться объемом выброшенной породы. В табл. 20 приведены данные американских исследований о параметрах воронок в скальных породах [35]. Причина такого выбора данных состоит в том, что американцы проводили свои взрывы с применением бетонной забойки, что сводило к минимуму влияние истечения газов. Поскольку в указанной работе непосредственные значения объемов воронок отсутствуют, то они были определены на основании радиуса r_в и глубяны воронки h_в в предположении, что воронка имеет коническую формулу, т.е. справедлива формула

(41)

$$V \simeq kr_{\rm B}^2 h_{\rm B},$$

Такая апроксимация формы воронки в скальных породах представляется допустимой из следующих соображений. В мягких грунтах, согласно работе [35] объем воронки достаточно надежно выражается формулой (41), если коеффициент к принять равным 1,4, т.е. фактический объем воронки примерно на 35% больше объема конуса с теми же значениями раднуса и глубины. Это отклонение формы воронки от конуса при взрывах в грунтах связано, очевидно, с большим показателем простреливаемости, что и придает воронке характерный чашеобразный вид и увеличивает ее объем. В скальных породах показатель простреливаемости примерно на полтора-два порядка меньше, поэтому форма воронки должна приближаться к конусу. 126

Таблица 20

Масса за- ряпа, кг	Глубина запожения заряда, м	Глубина воронки, м	Радиус воронки,м	$1,05 r_{B}^{2} h_{B}$	0,93 q ^{0,75}
454	4,48	1,58	4,77	38	93
	4,48	2,68	5,16	74	
	2,93	1,98	5,09	52	
	2,93	1,46	3,7	21	1
1,82.10 ³	7,73 13,02	7,59 10,58	13,61 17,37	1,46·10 ³ 3,3 · 10 ³	1,5.10 ³
2,18 [.] 10 ³	12,9 15,4	7,8 7,95	14 15	1,6·10 ³ 1,83·10 ³	1,7.10 ³
	17,8	7,1	15,5	1,78-10 ³	

Объемы видимых воронок в скальных породах, вычисленные по рормуле (44), приведены в предпоследней графе табл. 20, В последна графе даны объемы, соответствующие второму члену в формуле (43). Сравнение двух последних граф таблицы показывает довольно корошее совпадение приведенных в них объемов. Исключение составиют лишь данные для заряда массой 454 кг, для которого фактический объем воронки оказался заметно меньше вычисленного. Поманмому, из . . всех приведенных в табл. 20 данных результаты по врывам заряда этой массы являются наименее надежными. Это связано с его относительно малым значением. Отечестверный и заубежный опыты похазывают, что достаточно хорошо повторяющиеа данные по вэрывам в скапьных породах получаются при массе за-Идов 5 - 10 т и более. При меньшей массе зарядов из-за неодноюжостей массивов, как правило, наблюдается значительный разброс езультатов, что, кстати, видно и из значений объемов при вэры-³⁸ зарядов массой 454 кг. Следует также отметить, что при взрынах относктельно малых зарядов вблизи свободной поверхности, где Урещеноватость пород всегда максимальна, следует ожидать относительно более ранний прорыв продуктов взрыва в атмосферу, что неизбежно приведет к снижению эффекта действия вэрыва. И хотя в опытах американских исспедователей подводящие к зарядам шурфы бетонвровались, тем не менее сравнительно ранний прорыв продуктов возможен, С этим, по всей вероятности, и связано различие фактических и вычисленных объемов воронок для заряда массой 454 кг.

Примерное согласие объема видимой воронки в скалыных породах величины, соответствующей второму члену формулы (40), свиде-^{Тальствует} о правильности толкования физического смысла втой фор-^{Мулы}. Ес первый член дает ту часть объема видимой воронки, кото-127

Таблица 21

Номер площад- ки	К _п , м ³ /кг	Мас- са эа- ряда, кг	Глубина заложения, м	Чис- ло взры вов	Средний объем во- ронки V _{ср} , м ³	Объем V, вычислен- ный по формуле (14),м ³	Отноше- ние <u>V ср</u> V
1	0,72	20 8	1,35-2,0 1,54	8 2	24,6 7,3	20 8,8	1,23 0,83
2	0,2	20 16 8	1,52-2,10 1,38-2,10 137	12 3 1	8,9 8,8 4,7	11,5 9,4 5,6	0,78 0,94 0,84

рая обусловлена котловой попостью, в то время как второй член представляет действительно выброшенный объем. Очевидно, формуле (40) можно придать более общий вид, если коэффициент при первом члене выразить через показатель простреливаемости грунта K_{n} .

Принимая, что в объем (м³) видимой воронки входит 0,85 объема котловой полости, получим

$$V = 0.85 K_n Q + 0.93 Q^{0.75}$$
(42)

Двучленная формула (42) может быть, очевидно, использована как при определении объема видимых воронок в грунтах, так и в скальных породах, для которых первый член при взрывах небольших зарядов можно не учитывать. Действительно, если принять $K_{\Pi} = 0.01 \text{ м}^3/\text{ кг}$, что справедливо для скальных пород, то первый член сравнивается со вторым примерно при $Q = 10^8$ кг и будет составлять от него 0,1 при массе заряда около 30 т. Это значит, что при большинстве современных промышленных взрывов в скальных породах решающее значение в формуле (42) имеет второй член.

Для шлюстрации применимости формулы (42) при взрывах в грунтах в табл. 21 приведены результаты взрывов, полученные в специальных опытах [55]. Результаты сопоставления фактических и расчетных объемов видимых воронок, приведенные в последней графе, показывают их удовлетворительное совпадение: максимальное расхождение по объему не превышает 25%. Основная погрешность при расчете объема по формуле (45) вносится, очевидно, за счет показателя простреливаемости К_п, эначение которого даже в пределах одной и той же плошалки колеблется на 20 – 40% около некоторого среднего эначения.

На рис. 62 видно, что прямые 1 и 2 параллельны между собой, т.е. показатели подобия для видимой воронки и навала грунта одинаковы. Формула для расчета объема навала групта, определенная по лишии 1 на рис. 62, имеет следующий вид:

$$V_{\rm u} = 0.29 Q + 1.27 Q^{0.75}$$

(43)

Такая структура формулы пля навала грунта, на первый взгляд, кажется странной. Исходя по развитых выше представления, можно было ожидать, что показатель подобия в формуле для объема навала грувта должен составлять 0.75. Тот факт, что он оказался отличным от этого эначения. можно объяснить следующим образом. Дело в том, что при пределении объема навала. как отмечалось выше, предполагалось, что первоначальное положение свободной поверхности остается неизменным. В сействительности это не так.



Рис. 63. Профили купола (1), вилимой воронки (2) и навала грунта (3) при взрыве заряда (4) на выброс массой 1000 т

Для вплюстрации этого замечания на рис. 63 приведены контуры купола поднимающегося грунта (1). На этом же рисунке показаны профилн видимой воронки (2) и навала грунта (3). Из сопоставлений профилей 1 и 2 видно, что выброс грунта происходит лишь из некоторой центральной части купола, в то время как его периферийные участрой центральной части купола, в то время как его периферийные участим только приподнимаются, но не выбрасываются. Из сравнения профилей 1 и 3 следует, что высота поднятия поверхности грунта во выешних частях купола соизмерима с высотой навала грунта. Наличие остаточного поднятия поверхности было зафиксировано и в результате пробных раскопок навала грунта вблизи края воронки [15].

Все эти данные свидетельствуют о двойственной природе того поднатия поверхности, которое образуется вокруг видимой воронки. Одна часть этого поднятия образована выброшенным грунтом, который в представляет собственно навал грунта. Вторая часть является результатом остаточного вспучивания поверхности, которое по существу связано с процессом образования котповой полости. Рассмотрим механизм формирования втого вспучивания более подробно.

Когда взрыв производится в безграничной среде, то движение вокруг сосредоточенного заряда имеет центральную симметрию, а образующаяся полость имеет практически сферическую форму. При этом кинетическая энергия движения сферических слоев грунта, прилегаюших к заряду, постепенно передается более удаленным слоям, которые, в свою очередь, подвергаются деформированию и вовлекаются в авпжение. Если тецерь ограничить безграничную среду с какой-пибо сторовы плоской свободной поверхностью, то картина движения вокруг заряда изменится. По направлению к свободной поверхности приращение массы грунта, начиная с некоторого расстояния, равного п.н.с., прекратится. И тот запас кинетической энергии, который был к этому моменту времени накоплен в среде, будет расходоваться голько на совершение работы против сил сопротивления движущейся среде, в то время как расход энергик на объемное деформирование

ковых слоев грунта в этом направлении прекращается. В других же направлениях втот расход сохраняется, в результате чего интенсивность движения (смещение) слоев грунта, прилегающих к заряду, в этих направлениях должна быть меньше, чем по направлению к свободной поверхности. Именно благодаря этому явлению своборная поверхность поднимается в виде купола, хотя источником движения поднимающегося в куполе грунта является та же энергия, за счет которой образуется в котловая полость. В эпицентральной части купола на поздних стадиях его развития проявляется еще действие газообразных продуктов, остающихся в котловой полости (газовое ускорение), однако периферийную часть купола это действие не захватывает. Повтому тот объем грунта, который вслучивается во внешних частях купола, должен подчиняться тем же законам подобия, что и объем котловой полости.

Дополнительным свидетельством в пользу правильности отождествления поднятия поверхности грунта вокруг воронки с процессом образования котловой полости являются результаты измерения траекторий движений внутренних точек среды вблизи краев воронки [40]. На рис. 64 проведено сравнение таких траектория и куполов при вэрыве заряда и сжигании навески пороха в одинаковых усповиях. В первом случае образуется котловая полость, во втором случае продукты сгорания по мере повышения в них давления сразу расширяются прекмущественно в сторону свободной поверхности. В результате этих различий в механизме действия газообразных продуктов получается и различный эффект. При взрыве наблюдается интенсивное движение внутренних точек вблизи стенок воронки, которое представляет такое же движение среды, как и вниз от заряда, т.е. ведущее к образованию котловой полости. Однако это движение видоизменено за счет влияния свободной поверхности. Именно благодаря этому внутреннему движению и происходит поднятие внешних частей купола при взрыве, которое при сжигании пороха, т.е. при действии только газового ускорения, выражено гораздо слабее.

На основании изпоженных данных формула (43) может быть иктерпратирована следующим образом. Первый ее член характеризует объем вспучивания. Поскольку процесс вспучивания на краях кулопа связан с развитием котловой полости, то и показатель подобия для этой части объема навала, как и в формуле (40), равен единице. Второй член формулы (43) дает объем действительного навала, который образуется выброшенным из воронки грунтом. И не случайно, очевидно, отношение коэффициентов при вторых членах формул (40) и (43) равно 1,37, что по порядку величины соответствует коэффициенту разрыхления грунта при выбросе его из воронки.

Рассмотрим теперь вопрос о подобии применительно к линейным размерам воронок выброса. На рис. 65 приведены зависимости радиуса и глубины воронки от массы заряда для вэрывов на выброс в глинах. Как и для объема воронки, эти зависимости прямолинейны во всем диапазоне массы зарядов. Если представить зависимость пинейного размера воронки L от массы заряда Q в виде $L \sim Q^m$, то оказывается, что для радиуса воронки показатель подобия m ра-130



Рис. 64. Сравнительные траектории движения внутренних точек вблизя края воронки при взрыве заряда массой 0,4 г (а) и при сжигаин навески пороха (б); в - купола при вэрьше (сплошные линии) и сингании пороха (пунктирные линии); кружочки - начальное положеие точек, кресты - конечное положение

ее 0,31, а для глубяны воронки – 0,29. Полученные величины согпасуются с показателем подобия для объема воронки, равным, согласво рис. 62, 0,91, так как объем воронки V связан с ее радиусом г_b плубиной h_в соотношением [35]

$$V = 1,4r_{\rm B}^2 h_{\rm B}$$

3.3. Подобие при ядерных вэрывах на выброс

Выше показано, что наиболее вероятный, с физической точки эрения, тип зависимости объема воронки выброса от массы заряда может быть представлен двучленной формулой (38). Физический Смысл двучленной формулы состоит в том, что образование воронки происходит за счет двух различных процессов: собственно выброса породы и вытеснения породы из центральной зоны с образованием котловой полости. Выброс породы происходит в поле силы тяжести и потому подобие должно учитывать влияние этого фактора. Вытеснение по-Роды зависит от ее физико-механических свойств и в первом прибпожении должно подчиняться геометрическому закону подобия. В формуле (38) первый член соответствует той части общего объема випиой воронки, которая связана с котповой полостью, а второй член

17-2

00

51



Рис. 65. Зависимость радиуса (1) и глубины (2) видимой воронки от массы заряда при вэрывах на выброс в глинах характеризует объем действительно выброщенной породы.

Чтобы определить значения коэффициентов а и 6 в формуле (38) для ядерных взрывов, необходимо иметь данные по крайней мере по двум взрывам разной мощности, взорванных в одних и тех же породах. Необходимо также отметить, что формула (38) характеризует объем воронки. которая получается при взрывании зарядов на оптимальной глубине, т.е. такой глубине, когда объем воронки близок к макси-Мально возможному для данных пород. В табл. 22 приведены данные по некоторым ядерным

взрывам, которые могут быть использованы для определения указанных коеффициентов [35, 37, 43].

На рис. 66 приведена зависимость объема видимой воронки от мощности взрыва. Из рисунка видно, что денные по взрывам в аплювии и туфах практически совпадают и могут быть описаны единой зависимостью, а то время как точки, соответствующие объемам воронок при взрывах в крепких породах типа базальта, пежат заметно ниже.

На основании приведенных на рис. 66 данных были определены коэффициенты в формуле (38), которые оказались равными: для аллювия, туфа и песчаника $a = 2,5 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{кт}$, $b = 7,5 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{кт}^{0,75}$, для базальта соответственно 1.9·10⁴ и



Рис. 66. Зависимость объема видимой воронки выброса от мощности ядерного взрыва:

1-Нептун; 2-1003; 3-Скунер; 4-Седан; 5 - Д-Бой; 6- Кабриолет 4,5.104 м³/кт⁰,75. Если развитые в подразделе 3,2 представления верны и применямы к ядерным взрывам, то значение коеффициента а должно соответствовать объемам котловых полостей в соответствующих породах при взрыве заряда мошностью 1 кт.

На рис. 67 приведены данные о приведенных радиусах полостей камуфлетных вэрывов [37, 43, 53]. Они показывают, что размеры полостей при вэрывах в аллювии и туфах примерно одинаковы, в то время как в базальте радиусы полостей меньше и в свою очередь примерно совпадают с

Таблица 22

Варыв	Мощность q, кт	Объем воронки У, м ³	Глубина заложе- ник заряда h ₃ , м
Нептун	0,115	1,7 • 104	30,5
Станыр	35	1,74 · 10 ⁶	108
Седан	100	5,0 ' 10 ⁶	194
л-бой	0,42	3,19 · 10 ⁴	33
Кабриолет	2,5	1,38 · 10 ⁵	52
1003	1,1	1,11 · 10 ⁵	48
T-1	0,2	(3-4) · 10 ⁴	31,4

аналогичными эначениями при вэрывах в соляных массивах. Данные рис. 67 показывают, что радиус полости зависит от глубины вэрыва: с узеличением глубины он уменьшается. На нем указаны также знаения радиусов, которые вычислены для соответствующих вэрывов на выброс в предположении, что объем полости равен приведенным выше завчениям коэффициента а. Сопоставление фактических данных о размерах полостей и вычислительных, как видно из рис. 67. показывает удовлетворительное согласование, т.е. коэффициент с действительно соответствует показателю простреливаемости пород и при церных вэрывах. Это позволяет считать, что представление зависимости между объемом воронки и мощностью вэрыва в виде двучленвой формулы (38) и для вдерных вэрывов имеет определенный физический смысл.

Следует отметить, что формула (38) достаточно хорошо согласуегся с представлением о наличии среднего показателя подобия, который обычно принимается при обработке экспериментальных данных. Если зависимость объема воронки V от мощности вэрыва Q искать в виде $V \sim Q^m$, то наиболее общепринятое значение среднего показателя подобия равно 0,88. Фактический показатель подобия, как ведно из формулы (38), должен зависеть как от мощности вэрыва, так и от типа породы, т.е. от соотношения коэффициентов а и b. Так, согласно рис. 66, среднее значение показателя п для вэрывов в аллювии и туфах в интервале мощностей от 0,1 до 10 кт равво 0,8, а в интервале от 10 до 1000 кт – 0,89. В среднем по всему кнтервалу мощностей, в котором имеются экспериментальные даввые, он довольно близко совпадает с указанным значением m=0,88.

Интересно также обратить внимание на общий характер зависеиюсти V(Q), приведенный на рис. 66. Согласно общепринятому представлению, с увеличением мощности взрыва роль силы тяжести возрастает, и потому показатель подобия должен уменьшаться. При чалых мощностях, где принимается геометрический закон подобия, он должен равняться единице; при очень большой эквивалентной мас-



Рис. 67, Зависимость приведенного радиуса камуфлетной полости от абсолютной глубины заложения заряда: • - химические вэрывы; б - адерные вэрывы; 1 - вэрывы в туфе и аллювии; 2 - вэрывы в базальте и соли; 3 - эначения радиусов полостей, определенные по параметрам вэрывов на выброс

се заряда он стремится к пределу, равному 0,75. Из рис. 66 видно, что экспериментальные данные не обнаруживают такой тенденции к уменьшению т. Аналогичный вывод был получен и при анализе данных по химическим вэрывам, где при применении массы зарядов от 100 кг до 1000 т показатель т практически сохраняет постоянное эначение, Это постоянство *т* **является по существу кажущимся и** в зависимости 'от коэффициентов а и в может примерно сохранять-MOHE BILS MON BILL BADM диапазоне изменения Q. Однако общее направление изменения л как раз обратно общепринятому: с увеличением Q средный показатель m, как следует из формулы (38), не уменьшается, а увеличивается. Это естественно, поскольку первый член с увеличением Q возрастает быстрее и при достаточно больших мощностях вэрыва средний показатель подобия будет прибляжаться к единице. В деяствительности этого значения он, очевидно, не достыгает, поскольку показатель простреливаемости, т.е. коэфициент а в формуле (41) с глубиной уменьшается,

Наконец, проведем сопоставление ядерных и химических вэрывов. Согласно подразделу 3.3, для вэрывов в грунтах типа глины и сутлянков при массе зарядов до 1000 т коэффициента равен 21 · 10⁴ м³/кт. Это значение примерно на порядок превосходит аналогичное значение коэффициента для ядерных вэрывов (для аллювия 2,5·10⁴, для базальта 1,9·10⁴). Однако для вэрывов хими-134 еских зарядов в скальных породах значение показателя простреливаности намного меньше, чем в глинах, и примерно совпадает с показателем простреливаемости ядерных взрывов.

козффициент b в формуле (38) для ядерных взрывов равен (4.5% 17,5) 10⁴ м³/кт⁰,75, Для вэрывов в глине этот коэффициент равен 104 M3/кт0, 75, т.е. несколько меньше, Получается своеобразное передаспределение ролей первого и второго членов: для химических корывов первый член сильнее, а для ядерных - второя член. По-видичону, это отражает различие в природе этих вэрывов. При химяеских вэрывах и фактические эначения показателя простреливаемосп в глине лежат заметно выше, чем при ядерных взрывах. На рис. 67 риведены значения показателей простреливаемости в глинах для различных глубин, определенные по размерам воронок выброса [53]. Из вих видно, что радиусы полостей химических взрывов примерно в 2 раза меньше соответствующих значений при ядерных взрывах и такне обнаруживают тенденцию к уменьшению с глубиной. Не исключено, то сдерный взрыв в гленах также характеризовался бы примерно таны же большим уплотнением грунта, что и жимические взрывы, хотя моне вероятно, что простреливаемость грунтов при химических вэрыых в пелом больше, чем при ядерных взрывах. Во всяком случае, кля в формулу (38) подставить показатель простреляваемости, соотнетствующий 1000-тонному вэрыву (35 м/кт1/3) и дающий а = = 18·10⁴ н b = 7,5·10⁴, то получится значение объема видимой ворихе для ядерного взрыва заряда с эквивалентной массой 1 кт в тине около 250 тыс. м³, фактический объем воронки для химичеоито 1000-тонного взрыва в глинах равен 232 000 м3, т.е. иличины близки между собой. Это значит, что формула (41) при подтаковке в нее соответствующих показателей простреливаемости моит быть использована для определения объема воронок как от хими-WCKEX, ТАК И ОТ ЯДОРНЫХ ВЭРЫВОВ,

Таким образом, подобне видимых воронок при ядерных вэрывах мажно определяться на основании двучленной формулы

 $V = K_{\pi}Q + bQ^{0,75}$

^{гда} V – объем воронки, м³;К_П – объем камуфлетной полости при върше заряда массой 1 кт в данных породах, м³/кт^{1/3}; b – коэфищент, характеризующий объем выброса при взрыве заряда массой 1 кт, м³/кт⁰,75.

Возможно, что в формуле (44) перед первым членом, так же нак в формуле (42), должен стоять коэффициент, меньший единацы, который означает, что в объем воронки входит не весь объем котовой полости. При химических вэрывах, как видно из формулы (42), этот коэффициент равен 0.85. Данных по ядерным вэрывам в настоящее время недостаточно для того, чтобы провести такое уточвене. Да оно фактически и не требуется, поскольку точность определение объема воронки вполне достаточна для практических целей.

Численное значение коэффициента b, по всей вероятности, срав-

135

(44)

нительно слабо зависит от типа пород и характера взрыва и может быть принято равным (4,5 ±1,5) · 10⁴ м³/кт⁰,75, Формула (44) может быть рекомендована для определения объема оптимальной внак мой воронки при ядерных взрывах разной мошности. Тип пород ток этом характеризуется коэффициентом К, который, в частности, может учитывать и такую характеристику пород, как их газовость. т.е. способность выделять газообразные компоненты при плавления и необратимом деформировании породы в ближней зоне взрыва.

3.4. О подобни: вэрывов горизонтальных цилиндрических зарядов

Интерес к варывам горизонтальных цилиндрических зарядов в последнее время возрос в связи с проблемами мелиорации. В настоящее время масштабы строительства каналов с помощью взрывов непрерывно расширяются. Вместе с тем многие вопросы теории действия шилиндрических взрывов на выброс еще остаются до конца не решенными. В результате этого имеют место случак неулачного использования подобных вэрывов, которые чаще всего наблюдаются при резком изменении условий варывания, когда понменимость вмпирических зависимостей становится затруднительной. Одним из основных daxторов, роль которого экспериментальным путем исследована недостаточно, является как раз масштабный эффект, С увеличением массы зарядов эмпирические формулы, установленные с относительно малыми зарядами, не оправдывают себя. Надеяться на установление надежных формул применительно к большим масштабам трудно, поскольку подобные взрывы сравнительно малочисленны, проводятся в различных условиях и дорогостоящи, чтобы проводить их специально иля исследовательских целей.

На основании представлений, развитых в подразделах 3.1-3.3, в которых рассмотрены вопросы подобня взрывов при сосредоточенных зарядах, представляется возможным обсудить с аналогичных позиция и вопрос о подобни взрывов горизонтельных цилиндрических зарядов, опираясь на тот экспериментальный материал, который к настоящему времени уже накоплен как в промышленности, так и в работах исследовательского характера. Напомним, что основная идея состоит в том, что воронка выброса образуется за счет двух факторов: собственно выброса породы и котловой полости, Образование полости связано с объемным деформированием породы. Поэтому затраты энергин взрыва на образование полости при наличии цилиндрической симметрии должны быть пропорциональны площади поперечного сечения заряда или образующейся шилиндрической полости.

При взрыве шилиндрического заряда наиболее распространенной характеристикой является не общая масса О , как в случае сосредоточенных зарядов, а масса заряда (кг) на единицу его длины (м). В дальнейшем вту массу будем обозначать через q . Если обозначить через q1 ту часть массы заряда, которая расходуется на деформирование породы и образование полости, то можно записать соотношение 136

$$q_1 \sim L^2$$
,

где L - линейный размер деформируемого объема.

Для радиуса полости г , следовательно, будет справедливо равенство

$$r_{\rm fl} \sim q_1^{1/2}$$
 (46)

Остальная часть массы заряда, которую обозначим через q_2 , расходуется на перемещение породы за пределы воронки в поле силы тяжести. Масса перемещаемой породы *M* пропорциональна площади поперечного сечения воронки, т.е. L^2 , где L – характерный линейщый размер воронки. Чтобы выбросить породу, ее надо подлять на высоту порядка L. Значит затраты энергии должны быть пропорциональны *ML*. т.е. L^3 . Отсюда следует равенство

$$q_2 \sim L^3$$
. (47)

Линейный размер объема выброшенной породы, следовательно, будет пропорционален $q^{1/3}$.

Так как общая масса саряда слагается из q1 и q2, то

 $q = q_1 + q_2 = AL^2 + BL^3$,

где L – некоторый общий керактерный линейный размер; A и B – постоянные коэффициенты,

Наиболее привычной является форма записи, когда в качестве аргумента берется масса заряда и находится зависимость размеров вородки или выемки от этого аргумента. Чтобы составить такую зависимость, представим площадь поперечного сечения выемки в виде двучленной формулы

 $S = S_n + S_n, \tag{49}$

где S_п и S_в - составные части выемки, образованные соответственно за счет вытеснения (уплотнения) породы и ее выброса. Для указакных составных частей можно записать следующие выражения:

 $S_n \Rightarrow aq,$ (50)

$$s_{\rm B} = b q^{2/3}$$
 (51)

137

(48)

18-1

コのマ



Рис. 68. Зависимость площади поперечного сечения горизонтальной выемки (1) и камуфлетной цилиндрической полости (2) от массы зарада на единицу длины

Отсюда общая зависимость площади поперечного сечения выемки от массы заряда должна иметь вид

 $S = aq + bq^2/3$

(52)

Физический смысл коэффициента а , как и в случае вэрывов сосредоточенных зарядов, состоит в том, что он характеризует показатель простреливаемости грунта; коэффициент b соответствует объему выброшенного грунта при взрыве некоторого единичного заряда.

Для определения значений коэффициентов а и b были использованы данные о параметрах выемок, опубликованные в работах [26, 38, 39, 48]. Вполне естественно при этом ожидать сравнительно большого разброса точек, поскольку используемые данные относятся к различным грунтам и к разным условням взрывания.

На рис. 68 приведена зависимость площади поперечного сечения выемки от массы заряда на единицу его длины. Сплошная линия соответствует формуле (52) при вначении коэффициентов: $a = 0.15 \text{ м}^2/(\text{kr/m})$, $b = 1.3 \text{ м}^2/(\text{kr/m})^2/3$. Точность определения коэффициентов составляет примерно ± (0.05 ± 0.1). Согласно ра-



Рис, 69. Сечение выемки, образованной взрывом горизонтального заряда выброса на оптимальной глубине

боте [39], площадь сечения шилиндрических полостей в грунтах при взрывах удлиненных зарядов описывается формулой

 $s = (0, 18 \div 0, 44) q.$

(53)

Среднее значение показателя простреливаемости равно 0,31 м2/кг. Сопоставление этого значения с определенным выше значением коэфящнента в = 0,15 м²/кг показывает различке приблизительно в 2 раза. Отсюда можно заключить, что при образовании выемки только половина камуфлетной полости влияет на ее общее сечение. На рис. 69 приведено сечение характерной выемки. Видно, что при цилиндрических вэрывах действительно имеет значение только нижная половина котловой полости; верхняя половина попадает в объем выброшенной породы. Поэтому кажется вполне естественным, что значение коэффициента а оказалось примерно в 2 раза меньше показателя простреливаемости. Напомним, что при взрывах сосредоточенных зарядов имеет место аналогичное явление с той лишь разницей, что заняжение менее существенное (около 15 %), Различие вклада полости в общий объем образующихся выемок и воронок при цилиндрических и сосредоточенных зарядах объясняется, очевидно, тем, что шлицарические заряды обычно взрываются на отвосительно малых глубинах: показатель действия выброса для них равен 2,5 - 3,0, в то время как при сосредоточенных взрывах - не более 2, Совпаде-Ние порядков величии коэффициента в и показателя простреливаезарядов представлемости показывает, что и для шилиндрических ние зависимости объема выброса от массы заряда в виде двучленной формулы себя оправдывает. Это позволяет видеть на основе такого подхода возможность дальнейшего рассмотрения закономерностей развития цилиндрического взрыва на выброс.

На рис. 70 приведены зависимости линейных размеров выемок от массы заряда на единицу длины. Естественно предположить, что линейные размеры пропорциональны корню квадратному из площади полеречного сечения выемки. Для их определения могут быть рекомендованы следующие формулы:

 $\Delta = (2,7 \div 3,0) \sqrt{0.15 q + 1.3 q^{2/3}};$

(54) 139

18-2

$$h = (0,4 \div 0,7) \sqrt{0,15 q} + 1,3 q^{2/3},$$

где Ди н- шприна и глубина выемки, м.

Линин на рис. 70 как раз охватывают области, соответствующие Линин на рис. 70 как раз охватывают области, соответствующие указанным в формулах (54), (55) диапазонам изменения коэффиинентов, Следует подчеркнуть, что наиболее объективной характеристикой выемки является плопадь ее поперечного сечения, в то время тикой выемки является плопадь ее поперечного сечения, в то время как линейные размеры более подвержены влиянию случайных факторов как линейные размеры более подвержены влиянию случайных факторов и, в частности, сильно зависят от связности грунта, влияющей на оползание бортов выемки. Повтому при неизменной общей площади сечеипа глубина и ширина выемки могут изменяться в широких пределах,

Существенный интерес представляет вопрос об определении оптимальной глубины заложения заряда, при которой можно получить максимальную плошадь сечения выемки. Для малых масштабов вэрыва етот вопрос решается сравнительно легко, поскольку всегда есть



Рис. 70. Зависимость ширины (1) в глубины (2) выемки от массы заряда на единицу длины 140



Рис. 71. Зависимость приведенной площади сечения выемки от отвосительной глубины заложения заряда для различных участков Большого Номонганского канала:

1-3 - участки, на которых видно влияние глубины

возможность провести специальную серию вэрывов на различной глубине. Однако для больших масштабов такой метод неприемлем из-за его трудоемкости и дороговизны. Вместе с тем именно для больших масштабов выбор правильной глубины расположения зарядов имеет первостепенное значение. Известные из практики случай неудачных фомьпшленных взрывов обусловлены в основном неправильным выбором глубины. Из всего сказанного становится очевидным, что определение критерия подобия для оптимальной глубины заложения цилинфических зарядов является важной задачей.

Данных по экспериментальному определению оптимальной глубины в настоящее время недостаточно для того, чтобы по ним постровть надежную зависимость этого параметра для масштаба вэрыва, Для малых масштабов такие данные вмеются в работе [26]. Некоторые сведения для крупных взрывов можно получить из результатов промышленных варывов, проведенных трестом Союзварывпром, Зависимость относительной илошади сечения разных участков Большого Номонганского канала от приведенной глубным запожения зарядов показана на рис. 71. В целом разброс точек велик. Однако по точкам, относящимся к определенным участкам канала и отмеченных на рисунке одинаковыми значками, можно заключить, что основная взорвана на оптимальной глубине. Поэтому при оп-MACCA зарядов ределении общей зависимости оптимальной глубины от массы заряда фактические глубины заложения зарядов при указанных про-Мышленных варывах можно в первом приближении считать оптималь-HUMH.



Рис. 72. Зависимость оптимальной глубины заложения заряда от массы заряда на единицу длины

На рис. 72 приведена зависнмость оптимальной глубины заложения зарядов от их массы. Чтобы описать экспериментальные точки аналитической зависимостью, предположим, что такой линейный переметр, как оптимальная глубина, также пропоринонален корно квадратному из площади сечения выемки. На рис. 72 проведены дее зиния, соответствующие формуле

 $k_{OBT} = k\sqrt{S},$ (56)

гле і в одном случае равно 0,43; во втором - 0,69. Сопоставленне спині с експериментальными точками показывает, что не одна из нол не согластется с ними во всем диапазоне массы зарядов. При небольстк масштабах вэрыва формула (59) с ковфриниентом 0,43, стемата, удовлетворительно описывает данные эксперимента, в то время как при больстка масштабах оптимальная глубина возрастает спо быстрее.

Чтобы понять причины указанного отклонення, сопоставим оптиматькие глубны с раднусом камуфлетной пилиндрической полости. На рис. 72 (личня 3) приведена средняя зависимость раднуса пилистической полости ст массы заряда, согласно формуле (53). Как вы-

во вз рисунка, при малых масштабах раднус полости меньше оптикальной глубины. Это и определяет, как видно из формулы (52). налый вклад ее в общее сечение выемки. Однако с ростом массы заряда первый член формулы (52) растет быстрее, поэтому его роль постепенно увеличивается. При массе заряда 10 кг/м раднус полост становится равным оптимальной глубине заложения заряда, Если бы при дальнейшем увеличении массы заряда при выборе оптимальной пубны мы следовали формуле (56), то глубина заложения заряда жазалась бы меньше того раднуса полости, которую в состоянии создать данный заряд. Размещая таким способом заряд, мы, очемано, пришли бы к тому, что полость оказалась бы недоразвитой. И хотя по выбросу эффект был бы оптимальным, тем не менее по размерам полости получался бы проигрыш. А поскольку вклад полости в общее сечение выемки при больших масштабах взрыва является определяющим, то, очевидно, и выброс оптимальной глубины надо вести менно по этому фактору действия взрыва. По всей видимости, для фразования полости располагать заряд на глубние, меньшей радиуса PTOR HOROCTH. вецелессобразно,

Начиная с массы заряда, равной 10 кг/м, как видно из рис. 72. радвус полости фактически совпадает с оптимальной глубиной заложеня зарядов. На основание изложенных выше соображений этот реаультат представляется теперь физически понятным. Он имеет также в практическое эначение, поскольку дает основание для разработна простого метода определения оптимальных глубин при крупных врывах в различных грунтах. Действительно, поскольку оптимальная глубина равна раднусу полости, то для данного участка, где необхоамо определить оптимальную глубину, достаточно провести небольшой цилиндрический взрыв в скважене и определить показатель простреливеемости для данных грунтов. Определив затем раднус полоста для заряда, который предполагается взорвать с целью создания нужной выемки, мы тем самым определим оптимальную глубину его заложения. Учитывая, что каналы могут иметь большую протяженность, переменную площадь сечения в проходить в различных грунтах, предлагаемый метод определения оптимальной глубины представляется перспективным.

Сопоставим теперь предлагаемый подход с теми подходами, которые в настоящее время приняты в практике вэрывных работ, Наиболее общепринятой считается [39] зависимость вида

$$d = k \sqrt{S_{s}}$$

где d - диаметр заряда; k - коэффициент пропорциональности.

Эта зависимость означает прямую пропорпиональность между массой заряда (на единицу длины) и площадью поперечного сечения выемки; т.е. соответствует геометрическому закону подобия. При таком подходе влияние силы тажести совсем не принимается во внимание. Учитывая малый диапазон массы зарядов, в которых обычно устанавливается эмпирическая связь массы заряда с площадью сечения выемки, формулы типа (57) могут достаточно хорошо описывать

143

L

(57)
результаты опытов. Формула (52) и график на рис. 68 показывают, что если представлять зависимость между массой заряда q и плошалью сечения выемки 'S в виде одночленной формулы вида S $\sim q^m$, то фактическое значение показателя степени m будет переменным. Так, при зарядах массой от 0,1 до 100 кг/м значение m изменяется от 0,68 до 0,75, т.е. 'все время остается заметно меньше единицы. 'Это значит, что при малых масштабах взрыва как раз нет геометрического подобия, и чем меньше масштаб, тем оно менее справедливо. Значение m приблюжается к единице при массе зарядов 1000 кг/м и выше, '

Для определения глубины запожения заряда в работе [39] рекомендуется формула вида

 $h_{\alpha} \sim q^m$

(58)

rne m= 1/3.

Эта формула также относится к сравнительно малым масштабам взрыва, Если считать, что глубина запожения пропорциональна корню квадратному из . площади сечения выемки, то, как следует нэ рис. 72, среднее значение показателя т в формуле оказывается равным 0,35, т.е. довольно близко совпадает с указанной в работе [39]. При этом следует подчеркнуть, что принимая m =1/3, мы отказываемся от геометрического подобия, которое было принято справедливым при сопоставлении площади сечения выемки и массы заряда по формуле (57). Эта противоречивость в обработке экспериментальных данных и конструкровании эмпирических формул вполне астественна, если при их построении не учитываются общефизические соображения. Применительно к глубине запожения зарядов принцип геометрического подобия, как видно из рис. 72, оказывается справедливым при массе зарядов от 100 кг/м и выше, где величина л в формуле (58) должна быть близка к 0,5.

При построения эмпирических формул для определения линейных размеров выемок также наблюдаются аналогичные противоречия. Отмеченные противоречия в существующих представлениях по действию горизонтальных цилиндрических зарядов на выброс находят естественное объяснение, если использовать предлагаемый в данной работе подход к вопросам подобия. Наглядность физических соображений, положенных в основу этого подхода, и его непротиворечивость по отношению к экспериментальным данным позволяют заключить о его перспективности и целесообразности дальнейших исследований.

Очевидно, в настоящее время связь между площадью сечения выемки S и массой заряда на единицу длины q целесообразно записывать в виде

$$S = CK_{n}g + hg^{2/3}$$

(59)

_{где} К_п - показатель простреливаемости грунта, м²/(кг/м); С -_{гозфищиент,} характеризующий долю использования котповой полости.

На основании имеющихся экспериментальных данных можно привять следующие численные значения коэффициентов: $C = 0.5 \pm 0.1$, $\chi_1 = 0.3 \pm 0.12 \text{ м}^2/(кг/м)$, $b = 1.3 \pm 0.1 \text{ м}^2/(кг/м)$. Неточность эпих коаффициентов определяется в основном отсутствием данных о показателях простреливаемости тех конкретных грунтов, в которых проводились промышленные и экспериментальные вэрывы. В дальвейшем, очевидно, на вту характеристику грунтов необходимо обратить особое внимание и определять ее при всех последующих вэрывах.

Злачение коэффициента b также требует уточнения. Указапяьй диаизон изменения этого коэффициента справедлив для тех грунтов, в которых проводились вэрывы, использованные при построении графиы на рис. 68. Для других грунтов коэффициент b, характеризуюши объем выброшенного грунта, может, по всей вероятности, взиеняться. Например, в сухих несках и лёссах, по сравнению с влажвыми грунтами, наблюдается плохой эффект выброса, хотя простреливемость их примерно одинакова. Это как раз и может быть связано с отличиями коэффициенте b для втих грунтов.

<u>3.5. Определение оптимальной глубины запожения</u> зарядов при вэрывах на выброс

Оптимальной глубиной заложения заряда при взрыве на выброс считается такая гнубина, при которой образуется воронка, выемка вли канал максимальных размеров. На основании развитых выше представлений о подобни можно проанализировать также и вопрос об определении оптимальной глубины.

Из проведенного анализа данных о параметрах воронок и каналов видно, что эффект образования видимых выемок определяется как непосредственно выбросом породы, так и ее уплотнением. Роль этих акторов неодинакова и зависит от масштаба вэрывов. В соответстви с этим меняются и критерии для выбора оптимальной глубины. На рис. 73 приведены кривые для объема котловой полости и выбюшенного грунта, характеризующие зависимость этих параметров от Пубины заложения заряда. При увеличении глубины оба вти объема возрастают, поскольку продукты взрыва на большей глубине успевают до своего прорыва в атмосферу совершить большую работу по пе-Ремещению и деформированию окружающего грунта. Однако общий ил их с глубниой различен. Котповая попость достигает некоторого изксимального значения и при дальнейшем увеличении гиубины запокения заряда остается практически без измспений. При этом общее деяствие взрыва будет постепенно приобретать все более внутренамя характер, пока вэрыв не станет полностью камуфлетным. Объем ке выброшенного групта возрастает лишь до некоторой глубины за-Ложения заряда и далее начинает уменьшаться. Это связано с тем, То запас кинетической энергии, которую взрыв сообщает грунту при

19-1



Рис. 73. Качественная зависимость объема выброса'(1) и котловой полости (2) от глубины заложения заряда при $h_{\rm B} > h_{\rm R}$ данной массе заряда, имвет вполне определенное ограна. ченное значение. Затраты же энергия на перемещевие грув. та в поле силы тяжести с увепичением глубины заложения заряда возрастают неограниченно. Поэтому оптимальный выброс грунта возможен лишь при некоторой определенной глубине. При дальнейшем увеличении глубины запаса книетической энергии становится недостаточно для подъема грунта над поверхностью земли и перемещения его за пределы

(60)

2438

ворояки, в результате чего общий объем выброса уменьшается. Определение оптимальной глубины запожения заряда должно учитывать проявление обонх указанных факторов (образование котповой полости и выброс грунта). Если глубина h, на которой полость достигает максимального значения, меньше іттубины h, обеспечивающей максимальный объем выброса, то выбор оптимальной глубины будет определяться выбросом породы. Котповая полость при этом будет заведомо успевать развиваться до максимальных значений и тем самым обеспечивать максимально возможный вклад в общее сечение выемки за счет уплотнения и вытеснения грунта из центральной зоны. Именно этот случай и показан на рис. 73. При этом надо только отметить, что сопоставлять кривые на этом рисунке можно лишь по горизонтальной оси, в то время как масштабы по вертикали для крявых V в и V различны. При выборе критерия подобия для оптимальной глубныы в этом случае необходимо учитывать действие силы тежести. пропорцио-При взрыве сосредоточенного заряде затраты внергин напыны пинейному размеру воронки в четвертой степени, т.е. будет справедливо спедующее соотношение

. . .

где ho.c - оптимальная глубина заложения сосредоточенного заряда.

Для пинейного (ципиндрического) заряда мерой его энергии является масса ВВ на единных длины заряда. Масса выбрасываемого грунта пропорциональна площади сечения образующегося канала, т.е. L^{*}, где L- пинейный размер канала. Чтобы выбросить ету массу грунта за пределы канала, его необходимо поднять на высоту, также пропорциональную L, т.е. затраты внергии на выброс в случае пинейного заряда пропорциональны L³. Отскода для оптимальной глубины запожения пинайного заряда должно быть справедливо соотношение

Напомним, что формулы (60) и (61) справедливы в случае, если лубнав h_п меньше h_в (см. рис. 73).

Когда глубины h_п и h_в одного порядка, формулы (63) и (64) также справедливы. И лиць при h_п > h_в критерии подобия при определения оптимальной глубным могут измениться. Действительно, в ном случае максимальный выброс возможен при глубине заложения заряда, при которой котловая полость еще не успевает полностью сформироваться. Это значит, что вклад котповой полости в общее сетене воронки (канала) окажется меньше максимально возможного, Схематически это показано на рис. 74. Выбор оптимальной глубины ор $h_{\rm H} > h_{\rm H}$ оказывается не таким однозначным, как в случае $h_{\rm H} < h_{\rm H}$. Только в зависимости от абсолютного вклада V и И В в общий объем вядимой воронки или канала можно решить, что более целесобразно потерять в величине V , но обеспечить максимальный выброс грунта, или, наоборот, вэрывать на глубине h >h, в недостаток в выбросе $\Delta V_{\rm B}$ скомпенсировать за счет роста объема котповой полости в интервало глубии от h_в до h_п на величину ΔV_п. Как следует вз формул (38) и (52), с увеличением масштаба взрывов роль ютловой полости в образовании видимой воронки (канала) выброса возрастает. Поэтому можно ожидать, что и выброс оптимальной глубизы запожения зарядов при больших масштабах взрыва должен опрелепяться скорее глубиной ha . чем ha.

Рассмотрим теперь некоторые фактические данные, характеризуючее взменение оптимальной глубины с ростом масштаба взрывов. Ниже при ведены эначения оптимальной глубины для взрывов на выброс сосредоточенных зарядов различной массы в грунтах типа лёссовидвых суглинков в глин.

q,	KT	10	20	80	120	1000
hore	, M	1,4-1,5	1,9	2,5	2,7	5,0

В основном эти данные взяты из работы [15]. На рис. 75 приведена зависимость оптимальной глубины $h_{0.c}$ от массы заряда q. Если искать зависимость в виде $h_{0.c} \sim q^m$, то величина m, как видно из Рс. 75, близка к 0.25, т.е. справедлива формула (60). Это эначат, что радиус котповой полости при этих взрывах должен быть ченьше глубины заложения заряда. Приведенные выше данные об оптимальной глубине получены при взрывах в грунтах, для которых показатель простреливаемости равен примерно 0.25 м³/кг. Исходя кз этой величины, для различной массы заряда были вычислены рапиусы котловых полостей, значения которых также приведены на рис. 75. Из сопоставления видно, что при взрывах зарядов массой по 10 т радиус полости оказывается меньше оптимальной глубины запсжения заряда. Экстраполяция показывает, что радиус котловой полости должен сравняться с оптимальной глубиной примерно при зарядах массой 50-100 т. Однако эта оценка справедлива, если экстра-

(61)



Рис. 74. Качественная зависимость объема выброса (1) и котповой полости (2) от глубины заложения заряда при $h_{\rm B} < h_{\rm II}$ поляцию оптимальных глубия вести по формуле (60). В деястантельности, похазатель степени в формуле ho.c. ~qm может быть несколько больше 0,25, причем с ростом q он может плавно увеличиваться, приблюкаясь к предельному значению 0,33. Такому предположению не противоречат имеющнеся данные о вэрывах зарядов массой 10 т [15]. Экстраполяция по формуле (60), как ви дно из рис. 75, дает значение оптимальной глубины для заряда массой 10 т, равное 9 м. К сожалению, приведенные в работе [15] данные о взрывах зарядов массой 10 г относятся к двум различным экспериментальным площадкам: вэрыв на глубине 9 м

9612

был проведен в Казахстане вместе со всей серней опытных взрывов, включая 1000-тонный взрыв, в то время как взрывы на глубинах 11 и 13 м были проведены через год на опытной площадке вблизи Минеральных Вод. И хотя грунты на обенх площадках представлены одним типом – глинами, тем не менее физико-механические свойства их были несколько различны. Из приведенных в работе [15] данных можно лишь заключить, что оптимальная глубина для заряда массой 10 т может быть больше 9 м.



Рис. 75. Зависимость оптимальной глубины запожения сосредоточенного заряда (1) и радиуса котловой полости (2) от массы заряда 14° Глубина запожения 1000-тонного заряда равнялась 40 м. Это значение, как видно из рис. 75, практически совпадает с радиусом котповой полости. Можно предположить, что начиная с зарядов массой примерно 100 т оптимальные глубины будут совпадать с радиусами котповых полостей, для которых справедлив принцип геометрического подобия.

На рис. 72 приведена зависимость оптимальной глубины от массы заряда для линейных вэрывов. По горизонтальной оси отложена масса заряда на единицу длины. Данные о вэрывах малых зарядов (ло 10 кг/м) взяты из работ [26, 38, 39, 48], в которых прово дилось специальное экспериментальное исспедование вопроса об оптимальной глубине. Значения $h_{0.4}$ при q > 10 кг/м относятся к промышленным взрывам. Однако, как следует из рис. 71, глубины заложения этих взрывов можно считать близкими к оптимальным.

Наряду с данными об оптимальных глубинах на рис. 72 приведена также зависимость для радиуса цилиндрической котловой полости от массы заряда на единицу длины, которая карактеризует среддий показатель простреливаемости цилиндрических взрывов в грунтах [39].

На рис. 72 видно, что в цепом зависимость $h_{0,\pi}(q)$ можно разделить на два участка, на каждом из которых ее можно представить степенной функцией вида

На первом участке (до 100 кг/м) показатель m равен около 1/3. На втором участке m практически скачком возрастает до 0,5, причем значения оптимальной глубины на этом участке фактически совпадают с радиусами соответствующих котловых полостей.

Таким образом, из рис. 72 и 75 спедует, что зависимость оптимальной глубины от масштаба взрыва как для сосредоточенного, так и для линейного зарядов может быть разделена на два участка. Для первого участка, относящегося к малым масштабам взрывов (до 100 т для сосредоточенных зарядов; до 100 кг/м для линейных зарядов), оптимальная глубина определяется эффектом выброса грунта и для ее нахождения необходимо пользоваться формулами (60, 61),

На втором участке зависимость оптимальной глубины от массы заряда становится более сильной и может быть описана формулами вида

 $h_{0,c} = k_1 Q^{1/3}$ (62)

$$h_{0,r} = k_0 q^{1/2}$$
 (63)

где k_1 и k_2 - постоянные коэффициенты, характеризующие простреливаемость грунтов. Тот факт, что в этих формулах показатели подобия для оптимальной глубины оказались совпадающими с ссответствующими показателями для радиусов камуфлетных полостей.

представляется весьма интересным. Он означает, что при больших масштабах вэрыва (вторые участки на рис. 75, 72) размеры видемых выемок (воронок) определяются по существу эффектом ушлотнення грунта (образовання котповых полостей). Чтобы лучша понять этот результат, обратнися еще раз к изложенным выше результатам. Из них следует, что зависимость объема (площеди сечения) воронки выбооса (канала) от массы заряда при взрыве его на оптимальной глубине хасактеризуется формуламя (38, 52), Численные значения козфициентов в этих формулах равны: для сосредоточенных зарядов a = 0,21; b= 0,93; для пинейных зарядов a = 0,15, b = 1,3.Пер. вые члены в формулах (38, 52) характеризуют ту часть объема (площади сечения), которая обусловлена котловой полостью: вторые члены представляют выброшенный объем. Значения коэффициентов в формулах (38, 52) показывают, что при малых мессах зарядов вторые члены являются определяющими, Так, при массе сосредоточенно го заряда 1 кг объем выброса почти в 4,5 раза больше объема котповой попости; для линейного заряда это превосходство при массе 1 кг/м еще больше: почти в 9 раз. Поэтому вполне естественно, что при малых зарядах роль котповой попости незначительна.

С увеличением массы заряда, как видно из формул (38) и (52), вервые члены возрастают быстрее и поэтому вклад котловой полости в общий объем воронки (сечение канала) увеличивается. На рис. 76 показано сопоставление объемов воронки выброса и котловых полостей при различной массе заряда. Из него видно, что объем котловой полости становится равным объему воронки выброса примерно при массе заряда 10⁵ ÷ 10⁶ кг. Аналогичное равенство для линейного заряда (см. рис. 68) имеет место при массе заряда 10² – 10³ кг/м. Изменение показателей подобия для оптимальной глубины запожения заряда, как следует из рис. 75 и 72, происходит при массах зарядов соответственно 10⁵ кг и 10² кг/м. Сопоставление показывает, что изменение показателя подобия происходит при тех мас-



Рис. 76. Зависимость объема воронки (1) к котловой полости (2) от массы сосредоточенного заряда при одиночных взрывах 150

штабак, когда объемы полостей и воронок (или площади сечения ципендрических полостей и каналов) становятся одного порядка. Этот результат позволяет ввести в качестве определяющей характеристики грунтов показатель простреливаемости и на основе етого показателя выбярать критерий подобия при взрывах в различных грунтах.

Рассмотрим пример такого определения для некоторого грунта, у которого показатель простреливаемости для сосредоточенного заряда равен $K_{\Pi,c}$ (м³/кг). Тогда объем котловой полости V_{Π} для заряда массой Q_{0} определится равенством

 $V_{\rm n} = K_{\rm n,c} Q_0.$ (64)

Объем воронки выброса можно вычислить по формуле (40). Приравинвая (42) к (64), получим

$$0.15 K_{\rm m} = 0.93 0^{-0.75}$$
(65)

EAH

$$Q_0 = (6, 2/K_{\Pi - C})^4$$

Это выражение позволяет оценить масштаб вэрыва Q_0 , при котором меняется критерий подобия оптимальных глубин заложения зарядов при вэрывах на выброс. Ниже приведены значения Q_0 для различных $K_{\rm R_{-}C}$:

$$K_{\rm B,C}$$
, $M^3/{\rm kr}$, 0,1 0,25 0,50 0,75
 $K_{\rm B,C}$, $M^3/{\rm kr}$, 1.4.10⁷ 3,8.10⁵ 2,3.10⁴ 4,6.10³

При масштабе взрыва, когда Q = Q₀, оптимальная глубина заложения заряда h* практически равна радиусу котповой полости, которую о.с. может создать взрыв заряда массой Q₀ (кг).

$$h^*_{0\sqrt{C}} = r_{\Pi} = \sqrt{\frac{3K_{\Pi,C}Q_0}{4\pi}}$$
 (66)

Оптимальная глубина ho.c для заряда массой Q должна опредепаться спедующими выражениями:

Объедянив формулы (65), (66) в (67), получим окончательные выражения для определения оптимельной глубины $h_{0.C}$ (м) при данной массе заряда Q (кг) и показателе простреливаемости грунта $K_{1,C}$ (м³/кг)

$$\begin{split} h_{0,c} &= \sqrt[3]{\frac{3 K_{0,c}}{4 \pi}} Q^{1/3} \text{ при } Q > \left(\frac{-6,2}{K_{0,c}}\right)^4 ; \\ h_{0,c} &= 1 Q^{1/4} \text{ при } Q < \left(\frac{-6,2}{K_{0,c}}\right)^4 ; \end{split}$$
 (GB)

Проведем аналогичное рассмотрение для линейного заряда. Плошадь сечения камуфлетной цилиндрической полости

$$S_{n} = K_{n,n} q_{n}$$
 (69)

где Клал- показатель простреливаемости грукта для линейного заряда, м²/кг.

Плоцадь сечения канала при взрыве линейного заряда может быть определена по формуле (59). Изменение показателя подобия для оптимальной глубины, как это было показано выше, происходит при таком масштабе, когда сечения котловой полости и канала становятся соизмеримыми. Из рис. 68 видно, что при пинейных зарядах площади сечений полости и канала становятся практически равным и при массе заряда около 102 кг/м. Следует, правда, отметить, что зависимость площади сечения полости от массы заряда на рис. 68 проведена по среднему значению К п. л. равному 0,3 м2/(кг/м). Диапазон изменения К п. в разных грунтах довольно велик: от 0,18 до 0,45 м2/(кг/м). Фактические показатели простреливаемости для грунтов, в которых проводились вэрывы на выброс, использованные при построении графика на рис. 68, к сожалению, неизвестны. Поэтому приравнивая выражения (69) и (59), мы можем допустить некоторую погрешность в определении масштаба заряда 91 , при котором происходит изменение показателя подобия.

Из условия равелства выражений (69) и (59) имеем .

$$CK_{n,n}q_0 + bq_0^{2/3} = K_{n,n}q_0$$

Отсюда

$$q = \left(\frac{4}{K_{n,n}}\right)^3, \tag{70}$$

где $A = \frac{b}{1-C}$. При указанных выше эначениях b и C A = 2,6.

Напомилим, что 90 - это масштаб ликейного заряда, при котором 152 сроисходит изменение показателя подобия для оптимальной глубины. При этом масштабе глубина запожения равка радиусу цилиндричесгой полости, т.е.

$$h_{0,\pi}^* = r_{\Pi} = \sqrt{\frac{K_{\Pi,\pi} q_0}{\pi}}$$

Для произвольной массы заряда 9 будем иметь:

$$h_{0,1} = h_{0,1}^{*} \left(\frac{q}{q_{0}}\right)^{1/2} \operatorname{пр} u \quad q > q_{0};$$

$$h_{0,1} = h_{0,1}^{*} \left(\frac{q}{q_{0}}\right)^{1/3} \operatorname{пр} u \quad q < q_{0}.$$
(72)

Спедует еще раз подчеркнуть, что основная трудность, обусловлевная недостаточностью опытных данных, состоит в определении велитины q_0 . Так, если пользоваться средним показателем постреливаемости 0,3 м²/(кг/м), то из уравнения (70) q_0 получается равным 650 кг/м. Однако из рис. 68 видно, что взменение показателя подобия происходит при массе заряда 10^2 кг/м. Такое значение граничей массы заряда получается из уравнения (70), если коэфишент *А* положить равным 1,4. Уменьшение коэфициент *А* означает, что в действительности изменение показателя подобия может происходить при некотором масштабе, для которого площадь сечения попости еще не достигает площади сечения канала. Чтобы обеспечнть величну A = 1,4, необходимо в качестве условия для определения q_0 принять равенство

 $S_{\Pi} = 0,7 S,$

где S_п и S соответствуют уравнениям (69) и (59). Для получения окончательных выражений примем в формуле (73) А ≈ 1,4. Тогда, объединив (70), (71) и (72), получам

$$h_{0,\pi} = \sqrt{\frac{K_{\Pi,\pi}}{\pi}} q^{1/2} \text{ при } q > \left(\frac{1,4}{R_{\Pi,\pi}}\right)^3;$$

$$h_{0,\pi} = 0,67 q^{1/3} \text{ при } q < \left(\frac{1,4}{K_{\Pi,\pi}}\right)^3.$$
(73)

Рассмотрим, наконец, вопрос об оптимальной глубине при ядервых взрывах. Отметим сразу, что это рассмотрение значительно затруднено тем, что фактически ни для одного ядерного заряда не было проведено систематических исспедований взрывов на различной

20-1

153

(71)



Рис. 77. Зависимость глубины заложения заряда (1) и радиуса котповой полости (2) от мощности ядерного взрыва

глубине, которые позволяли бы определять для него опте мальную глубныу. По сущест ву имеющиеся данные о глубинах проведения ядерных вэрывов представляют значения отдельных глубин. при которых наблюдались воронки выброса. На рис. 77 и в табл. 23 приведены данвые о глубинах заложения зарядов и радиусах котповых полостей при различных по мощности ядерных варывах. Из-за отсутствия прямых данных о раднусах попостей при взрывах 1.004. 1003 H T-1 на рис. 77 пля ЭТИХ варывов привепены опеночные аначе-

ния, полученные по формуле (9) с использованием данных об объемах воронок выброса и глубинах заложения, приведенных в подразделе 3.3.

Из рис. 77 видно, что глубины запожения для всех проведенных взрывов значительно превышают (в 2,0 - 2,5 раза) соответствуюшие раднусы котловых полостей. Показательно при этом то, что объвмы воронок, как видно из табл. 23, в 2 - 4 раза превосходят объемы котповых полостей. Если бы вэрывы на выброс проводились на глубине, существенно превышающей оптимальную глубину, то объемы воронок вряд ли получились бы столь значительными по сравнению с объемами полостей. По-видимому, глубины заложения ядерных зарядов, указанные в табл. 23, близки к оптимальным. В условиях, когда объемы полостей заметно меньше объемов воронок, как следует из вышеизложенного, определяющим фактором при образовании видимой воронки является выброс породы, т.е. оптимальная глубина запожения заряда должна быть пропорциональна Q^m, где m = 0,25. Проведенная на рис. 77 линия с показателем подобия, равным 0,25, удовлетворительно согласуется с экспериментальными точками. Из этого рисунка видно, что практически во всем диапазоно возможных значений мощности ядерных взрывов оптимальная глубина остается больше радиуса полости. Это значит, что показатель подобия всюду должен равняться 0,25.

Напомним, что в случае тротиловых взрывов уже при массе заряда 0,1 кт радиус полости становится соизмеримым с оптимальной глубиной запожения заряда. Такое значительное различие между тротиловыми и ядерными взрывами представляется весьма интересным, хотя в настоящее время и не очень понятным. По-видимому, оно

Таблица 23

Варын	Мощ- ность, вт	Объем во- ронки V _{в 1} м ³	Глубяна заложения, м	Раднус полос- тн, м	Объем по- пости У п. м ³	Отношение V _в /V _п
Hen-	0,115	1,7.104	30,5	10	4,2.103	4,0
CEY-	35	1,70.10 ⁶	108	61 '	10 ⁶	1,7
Се- дан	100	5,0110 ⁶	194	82.	2,3·10 ⁶	2,2
Д- Бой	0,42	3,2.104	33	13	0,9°10 ⁴	3,6
Каб- ряс-	2,5	1,4.10 ⁵	52	23	0,5•10 ⁵	2,8
лет 1003	1,1	1,1.105	48			
T-1	0,2	3,5.104	31,4	1)

бусловлено различиями в способностих етих взрывов уплотнять пороку в создавать котловые полости, т.е. совершать механическую рабогу. В условнях, когда энергия выделяется в очень ограниченном объеме (при ядерных взрывах) относительно большая ее часть идет на кагревание, плавление к испарение породы. При тротиловых же вэрыых вспарение и плавление породы практически отсутствует.

. Основное различие между тротиповыми и адерными взрывами на выброс определяется, очевидно, именно начальной стадией, т.е. прочессом формирования котповой попости. Выброс же, по всей вероятвости, в обонх случаях происходит примерно одинаково. На ето, в истности, указывает сопоставление абсолютных глубин запожения ³⁴рядов: из рис. 77 следует, что для ядерного заряда массой 1 кт оптимальная глубина заложения составляет примерно 40-50 м; вэрыв тротилового заряда массой 1 кт, помещенного на глубину такого же ворядка (40 м), обеспечил воронку выброса, близкую к оптимальной [15]. Примерное совладение абсолютных значений оптимальных глубин при тротиловых и ндерных вэрывах представляется естественным: оптимальная глубина в первом приблюжении определяется конечным Авлением в котповой попости, величина которого в большей степени «Звисит от физико-механических характеристик породы и в меньшей степени - от природы взрыва.

Проведенное сопоставление показывает, что меньшая эффективвсть ядерных взрывов на выброс по сравнению с тротиловыми взрывами может быть объяснена различиями в способностих этих взрывсв создавать котповые полости.

В заключение необходимо отметить, что приведенные выше данные

20-2

о подобин оптимальных глубин нуждаются в уточнения. Если принципиальная возможность в реэком изменении показателя подобия с увеличениями масштаба вэрыва представляется физически обоснованной, то вопрос о количественных границах таких переходов требует дополнительных исспедований. По-видимому, учитывая важность вопроса о подобии вэрывов на выброс, целесообразно организовать систематическое исследование этого вопроса, включая проведение крупномасштабных опытных вэрывов.

4. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ СЕ ЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Началом систематического исследования сейсмического еффекте карывов в нашей отране следует считать 30-е годы, когда появивсь работа М.А. Садовского и Ф.А. Кирилова [68], в которой впервсе был обобщен имевшийся к этому времени опыт наблюдений сейсических колебаний от взрывов. Было отмечено, что колебания вблия поверхности носят сложный и продолжительный характер и их можво разделить на две основные фазы: первая фаза - вступление - с чалыми амплитудами и периодами, и вторая фаза, характерназующаяси максимальными значениями амплитуд и периодов колебаний. Вторая фаза получила название главной фазы, поскольку она определяи максимальное воздействие на здания и сооружения, и на изучеви этой фазы и было сосредоточено основное внимание.

Первоначально на сейсмограммах записывалось смещение во врежене в первые обобщающие зависимости строили для максимальных смещений в виде

$$w = k \left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^m.$$

Однако после обработки большой серии сейсмограмм, в том числе и самого крупного в то время взрыва в Коркино (заряд массой 1800 т), миснялось, что значения коэффициентов К и m не оотаются постенными и меняются в зависимости от типа грунтов, расстояния и футах параметров. Одновременно было замечено, что и период кочебаний также зависит от условий взрыва.

Большого успеха при обобщении сейсмических данных удалось доспинуть, когда в качестве параметра колебаний была взята окорооть, когорую вычисляли по величине смещения и периоду в предположении; по колебания носят гармонический характер. Этот параметр окааякся наиболее устойчивым, и для него удалось построить общую аввесимость.

Дальнейшее обобщение материалов сейсмических наблюдений было выполнено М.А. Садовским в работе [69]. Результаты этого обобчения легли в основу всех последующих сейсмических иоследований и чероко применяются вилоть до настоящего времени. Они включены в Единые правила ведения вэрывных работ[®] к по ним производится ченка сейсмической опасности всех промышленных вэрывов. Для опмаления максимальной скорости в работе [69] предложена формула

$$= K'\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{m'}.$$

(75)

(74)

Конфилиенты К' в л' ознались постоянными в широких пределах условий варывания и равны

$$r = 200 \left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{-1,5}$$
 (76)

THE $Q - B K r_s R - B M_s V - B CM/C_s$

Интенсивность сейсмических колебаний зависит от глубины запожения заряда, которая на практике обычно характеризуется показателем выброса. В работе [69] глубину запожения заряда учитывают с помощью формулы

$$v = \frac{200}{\sqrt[3]{0,4+0,6 n^3}} \left(\frac{0^{1/3}}{R}\right)^{1,5},$$
 (77)

где *n*- показатель выброса (отношение раднуса воронки к глубине заложения заряда).

Такие же полные в обобщающие данные были получены и по величинам смещений, периодам колебаний, влиянию свойств грунтов в другим параметрам. Работы М.А. Садовского явились етапом обобщения, в ходе которого были определены наиболее важные стороны явления. Последующие работы в етой области оказались направленными на анализ отдельных частей той общей картины явления, которая была синтезирована в работах М.А. Садовского.

Новый толчок сейсмическим воспедованиям дали ядерные взрывы. Большая мощность ядерных вэрывов по сравнению с обычными химическими вэрывами и воэможность их применения в мирных целях поставили перед вэрывной сейсмикой ряд новых задач. Наиболее важной на них явилась задача о подобки картины сейсмических колебаний в бляжной зоне взрыва. Особенность етой зоны состоит в том, что сейсмический сигнал еще не разделяется на те две характерные фазы, которые были выделены в работах М.А. Садовского. Большие масштабы взрывов и относительно малые расстояния, на которых необходимо оценивать сейсмическое действие, привели к тому, что эти фазы оказались наложенными одна на другую, причем изменились и соотношения амилитуд: в ближней зоне интенсивность первой фазы стала совзмеримой, а в некоторых случаях и больше интенсивности главной фазы. Все это потребовало более глубокого исследования сейсмического сигнала взрыва и выяснения природы отдельных фаз и волн, составляющих общий пут сейсмических колебаний. Изучение сейсмических колебаний в блюжней зоне показало, что оценка действия по максимальным амплитудам (скоростям) не может быть недежной, На различных расстояниях максимальное действие создавали разные по природе волны, для которых характерны свои зависимости от массы заряда в расстояния. На основе результатов экспериментальных всследований сейсмического действия ворывов был сформулирован ваучно-методический подход к изучению сейсмического еффекта в

ближней зона. Существо его состонт в том, что моделирование сейсмяческого еффекта надопроводить не по максимальным амплитудам, как его делалось раньше, а по отдельным типам воли. Необходимо было исследовать каждую волну в отдельности и для нее решить вопросы моделирования и подобия, а оценку общего сейсмического действия производить суммированием действия отдельных воли. В зависямости от природы образования и законов распростренения каждой волны определялся и тот диапазон расстояний, в котором она могла произвести максимальное сейсмическое воздействие,

Большую помощь при расшифровке сейсмических колебаний в ближней зоне оказали теоретические исследования [38, 79]. Исходя из модели источника типа центра расширения, излучающего волну сжатия, в рамках упругой постановки задачи в указанных работах проведен анализ волновой картины, которая образуется при взрыве вблизи свободной поверхности. Полученные теоретические осциплограммы в общих чертах согласуются с опытными, однако количественное согласне отсутствует. Это овязано с идеализацией задачи как в смысле свойств среды, так и модели источника.

Для изучения сейсмического еффекта взрывов вблизи овободной поверхности были проведены две большие серии опытных взрывов [72]. В задачу етих експериментов входило измерение параметров воли в широком диапазоне расстояний, начиная непосредственно от епицентра взрыва (или границы воронки) с тем, чтобы проследить процесс формирования опожного цуга сейсмических колебаний из оравнительно простого сигнала. Анализ экспериментальных осциллограмм показал, что картину колебаний трудно объяснить, если расоматривать взрыв в виде одного источника типа центра расширения. Из этого анализа вытекает, что взрыв представляет более сножный источник,

4.1. Лаижение ореды вблизи полости при взрыве у свободной поверхности

Опыты в среде типа пластилина, в которой кзучалось движение среды вблизи заряда при вэрывах у овободной поверхности, проводним в лабораторных условиях, которые позволили измерить параметры движения среды вблизи края воронки как на поверхности, так и внутри массива вблизи стенок полости. Это обеспечило возможность представить всю картину движения среды в центральной зоне взрыва, которая по существу и является источником излучения волн на большке расстояния. Кроме того, в лабораторных условиях удалось создать специальные источники волн, которые характеризуют отдельные стадни взрыва. Так, например, сжигание навески пороха практически не дает волны сжатия, но хачественно хорошо имитирует вторую стадию куполообразного поднятия среды в епицентральной зоне. Изучение волковой картины при таком источнике значительно облегчает расшифовку сейсмограмм, получаемых в тех же условиях при вэрыве.

Исследования ближней зоны потребовало разработки и создания

специальной методиям, которая позволяет измерять параметры движения среды в зоне больших и сложных деформаций. Эту задачу удапось решить путем применения миниатюрных разрядников, конструкция и схема питания которых были разработаны в ходе проведения исслепования [40].

4.1.1. Движение в центральной зоне

Траектории перемещений отдельных точек среды на границе воронки и за ее пределами при взрыве заряда массой 0,4 г на глубине 40 мм были показаны на рис. 10, На траекториях нанесены отметки времени. Интервал времени между двумя соседними точками, в зарисимости от частоты вспышек разрядника, составляет 0,5 или 0,33 мс, значение частоты показано цифрой (2 или -3 кГц) около начального положения каждой точки. Радиальное направление движения, которое соответотвует олучаю камуфлетного взрыва, показано стрелкой. Длина стрелки пропорциональна амплитуде смещения данной точки.

Первое, на что необходимо обратить внимание при рассмотрении рис. 19, - это характер движения среды. Направления движения практически. всех точек существенно отличаются от радиального, .что свидетельствует о влиянии свободной поверхности на движение среды. Отклонение от радиального направления происходит в одну и ту же сторону: наряду со омещением в радиальном направлении точки смешаются вертикально вверх. Амплитуда этого вертикального смещения в различных точках неодинакова. Она уменьшается по вертикали в направлении от овободной поверхности вниз и по горизонтали в направлении от эпицентра. Амплитуды смещения точек вверх вблизи овободной поверхности заметно больше радиального смещения в тех же точках.

Существенный интерес представляет продолжительность смещения отдельных точек. В случае камуфлетного взрыва продолжительность движения точек в направлении от взрыва определяется временем положительной фазы волны ожатия, значения которого для некоторых условий приведены в табл. 24. Днапазон расотояний, в котором измеряли траектории движения отдельных точек среды при взрыве на выброс заряда массой 0,4 г, составлял от 30 до 70 мм. Как видко из табл. 24, в этом диапазоне расотояний время положительной фазы волны скатия при камуфлетном взрыве аналогичного заряда должно составлять 0,2. 0,4 мс.

Время, в течение которого при взрыве на выброс наблюдается вертикальное смещение вверх, практически одинаково для всех точек и составляет 1,5 - 1,8 мс, что примерно в 5 раз превышает продолжительнооть положительной фазы волны сжатия при камуфлетном взрыве.

Таким образом, траектории движения отдельных точек среды в непосредственной близости от границы воронки при взрыве на выброо представляют собой результат сложения двух основных движений. Первое из них вызвано волной сжатия и в каждой точке направлено в

Таблица 24

Масса заряда, г	Расстояние от заряда до точки наблюдения, мм	Продолжительность по- пожительной фазы воп- ны сжатия, мо	
0,2	60	0,20	
1	80	0,30	
	126	0,45	
0,8	42	0,40	
	77	0,45	
	120	0,60	
	179	0,60	

радиальном направлении от заряда. Максимальное смещение в радиальном направлении, как видно из рис. 20, во всех точках не превышает величины того смещения, которое должно наблюдаться в этих точках в результате действия волны сжатия в услоних камуфистного взрыва. Второе движение - это практически вертальное смещение, первоначально направленное вверх, которое оказывается значительно более продолжительным по сравнению со смечением в радиальном направлении.

На рис, 78 приведены зависимости максимального смещения точек среды вверх от расстояния по вертикали (а) и по горизонтали (б). Из распределения по вертикали видно, что чем ближе слои к поверхности, тем больше у них амплитуда смещения. Учитывая, что связвость среды в зоне за воронкой сохраняется и после взрыва, можно считать, что в направлении по вертикали в среде возникают растяпавающие напряжения. Распределение по горизонтали показывают, то амплитуда смещения убывает в направлении от заряда. При татом даформировании неизбежно возникновение сдвиговых напряжений.

Таким образом, взрыв на выброс, если его рассматривать в качестве излучателя воли, можно представить в виде чвух источников. Первый источник - это начальная стадия развития взрыва, когда продукты детонации расширяются симметрично во все стороны. В ок-Ужающем грунте возникают деформации сжатия, которые порождают молну объемных напряжений. Второй источник - это куполообразное поднятие грунта в епицентральной зоне и овязанные с этим подня-Тем деформации в некоторой центральной зоне, которые имеют осевую симметрию. Основными типами деформаций при втором источнирастяжения, при в являются деформации сдвига и деформации направленность. определенную том деформации сдвига источника движение во всех точ-KMOIOT NOCKOTLKY OB CHOT второго нах происходит практически вертикально, в различие между отдельными точками только в амплитуде, то и деформации сдвига дол-

21-1



Рис. 78. Зависимости вертикального смещения точек среды: *а* -от глубины заложения разрядника; *б*-от расстояния по горизонтали между местом заложения разрядника и осью воронки; 1-10 мм; 2 -20 мм; 3 - 30 мм; 4 - 40 мм; 5 - 50 мм; 6 - 55 мм; 7 - 70мм

жны происходить практически в вертикальных плоскостях, параллельно оси воронки. По существу деформации сдвига вблизи воронки выброса происходят в некотором поверхностном слое и обладают • осевой симметрией с осью, перпендикулярной свободной поверхности. Преимущественное направление, по которому деформации сдвига должны передаваться, определяются природой этих деформаций. Им является направление, перпендикулярное к плоскостям сдвига. В рассматриваемом случае – это направление вдоль свободной поверхности.

Два источника, на которые можно расчленить взрыв на выброс, различны между собой не только по характеру создаваемых ими деформаций, но и по длительности действия. Второй источник способен излучать гораздо более длинные волны, чем первый. Действие первого и второго источников не разделено отчетливо во времени, поскольку второй источник вскоре после начала действия взрыва накладывается на первый. В ближней зоне они действуют практически одновременно. Однако лабораторные условия проведения опытов позволяют наблюдать их в отдельности.

Первый источник – это в сущности взрыв в безграничной среде. Второй источник можно имитировать, создав куполообразное поднятие среды не с помощью взрыва, а каким-либо иным путем, исключающим образование волны сжатия. Таким способом имитации явилось сжигание навески пороха на некоторой глубине. При этом продукты сгорания по мере повышения в них давления расширяются в сторону свободной поверхности, создавая куполообразное поднятие последней в некоторой епицентральной зоне.

Для сравнения на рис. 64 показаны формы куполов, образующихся при сжигании пороха в при вэрыве, и характерные траектории движения отдельных точек. Из этого рисунка видно, что при сжигании пороха в зоне за пределами воронки также наблюдается смещение частиц среды. Это смещение по своему характеру несколько отличает-162 с от движения точек при вэрыве. Отличие состоит прежде всего в гом, что при сжигании пороха отсутствуют характерные для вэрыва и выброс эначительные радиальные подвижки среды. Отсюда и разпчия в траекториях. Если при вэрыве на выброс траектория представляет собой кривую, в начальной точке касающуюся радиуса-вектора в эгой точке и затем плавно отклоняющуюся вверх, то при сжигании порая движение практически с самого начала направлено вертикально верх. Опыты с порохом обеспечили возможность наблюдать качественво примерно ту картину деформации среды, которая при вэрьве имеет несто на второй стадии и накладывается на поле перемещений, созданное волной сжатия.

Следует подчеркнуть, что имитация второй стадии взрыва на выбюс с помощью пороха носит только качественный характер. Так, зои заметных вертикальных смещения при взрыве больше, чем при скагання пороха. Отличаются и скорости смещения частиц, которые пи взрыве гораздо больше. Эти количественные различия объясняргся тем, что параметры самих куполов при взрыве и :: Сжигании поюха разнятся между собой. Так, скорости развития купола на начальых стаднях взрыва на выброс примерно в 5 - 8 раз больше, чем при окаганан пороха. Различия в параметрах движения куполов объясняюта в основном тем, что куполообразное поднятие в рассматриваемых случаях создаются различными факторами. Поднятие среды в эпиценральной зоне при взрыве на выброс происходит под влиянием волны жатия, продуктов взрыва и энергии упругих напряжений вокруг сфевческой полости. При сжигании же пороха все движение среды про-Кходит только в результате воздействия на нее продуктов сгорания, изление в которых к тому же нарастает постепенно.

Рассмотрим теперь, как могут изменяться характеристики второю источника воли в зависимости от глубины запожения заряда. Измерияя траекторий движения отдельных точек среды вблизи свободной поверхности при различных заглублениях заряда показали, что харакретраекторий при всех глубинах сохраняется практически неизменвы. Спедует заметить, что присущее взрывам на выброс движение в центральной зоне наблюдается и при таких глубинах, когда никакого выброса не происходит, а только вспучивается поверхность. Это свительствует о том, что представление о взрыве как о двойном испочнике излучения воли справедливо ие только для взрывов на выброс, но и для более заглубленных взрывов.

Коничественные характеристики движения среды вокруг заряда на агорой стадии развития взрыва вблизи свободной поверхности зависят и глубины запожения заряда. На рис. 79 приведены зависимости ампштуды максимального вертикального смещения вверх некоторых точек Среды от глубины запожения заряда. Эта амплитуда, которая в какойпо степени характеризует интенсивность излучаемых волн, по мере роста глубины запожения заряда увеличивается до некоторой максимальной величины. Глубины, при которых наблюдается максимальная сиплитуда, для различных точек среды несколько разнятся. В средвем это примерно 60 мм. Отсюда и максимальная интенсивность воле растягивающих и сдвиговых деформаций излучаемых на второй

2436



Рис. 79. Завискмости амплитуды максимального вертикального смещения (вверх) от глубины заложения заряда пля шести точек массива с координатами: 1 - x =50 мм; y = 10 мм; 2 - x =50 мм; y = 30 мм; 3 - x =65 мм; y = 10 мм; 4 - x =60 мм; y = 50 мм; 5 - x =70 мм; y = 10 мм; 6 - x =50 мм; y = 50 мм

стадян вэрыва заряда массоя 0,4 г, будет наблюдаться, очевилно, при глубине примерно 60 мм. При таких глубинах запожения для заряда массой 0,4 г уже не происходит выброса. Это значет, что максимальная нытенсивность волн за счет второго источника должна наблюдаться не при вэрывах на выброс, а при несколько больших глубинах запожения заряда, когда происходит в основном только интен-CHBHOO вспучивание поверхности, Продолжительность смещения среды на второй стадин вэрыва также зависит от глубины. Так, при глубине заложения заряда 15 мм продолжительность вертикального смещения вверх равна около 1 мс. Однако на всех остальных глубинах это время практически остается неизменным и равным 1,5 - 1,8 MC.

4.1.2. Изпучение волн

До сих пор мы рассматривали зону около воронки выброса, являющуюся источником излучения волн. Рассмотрим теперь то, что собственно излучеется, т.е. волновую картину на достаточно большом удалении от заряда. Начнем с волновой картины, которая наблюдается при сжигании пороха. На рис. 80 приведены ослиппограммы массовой скорости свободной поверхности на расстоянии 40 см от эпицентра. Опыты проводились на блоке пластилина размером 100 × ×100 см и топщиной 70 см. Источником возбуждения воли была навеска порожа массой 0,8 г, которую сжигали на глубине 40 мм. Осциплограммы показывают, что движение в вертекальном направлении начинается смещением вверх, в в горизонтальном - в сторону эпицентра. Уже сам факт излучения волн таким источником, который не генеркрует волну сжатия, является весьма интересным. Он прямо свидетельствует о том, что на стадии куполообразного поднятия среды в эпицентральной зоне происходит передача некоторой части энергин в окружающий массив, т.е. эта стадия является своеобразным ноточником волн.

Характер движения в точке на расстоянии 40 см от эпицентра качественно подобен движению в эрне около воронки, которая описана выше. Так, возвратный характер движения по горизонтальной составляющей соответствует растягивающим деформедиям в зоне вблизи



Рис. 80. Осциплограммы скорости колебаний свободной поверхности на расстояния 40 см от эпидентра: а,б - взрыв; в,г - сжигание навески пороха; х - горизонтальная составляющая; z - вертикальная составляющая

края воронки. Именно те растягивающие деформации, которые наблюдаются в центральной зоне, и способны, очевидно, быть источником волны, несущей в своей первой фазе растягивающие напряжения и вызывающей первоначальное смещение частиц в сторону взрыва. Вертикальное смещение, направленное вверх, также вполне согласуется с движением в центральной зоне. Оно вызвано, очевидно, волной сдвиговых деформаций, которая генерируется в центральной зоне за счет разности вертикальных смещений в различных точках. Маконмум скорости вверх распространяется вдоль свободной поверхности со скоростью около 500 м/с. Эта скорость примерно в 2,5 раза меньше скорости продольных звуковых волн. Такое соотношение также свилетельствует о том, что смещение вверх на осциллограмме вызвано прохождением волны сдвиговых, деформаций.

Осциппограммы массовой скорости свободной поверхности на расстоянии 40 см от епицентра при вэрыве на выброс заряда маосой 0,2 г на глубине 40 мм (см. рис. 80) показывают, что качественно декжение на обенх компонентах можно разделить на две части. На вачальном участке движение происходит по горизонтали в направлении от вэрыва и по вертикали - вверх. Скорость распространения первого вступления по горизонтальной составляющей равна 1200 -1300 м/с. Направление первоначального смещения и скорости его распространения Свидетельствуют о том, что вто движение вызвано волвой сжатия, Начальное движение вскоре осложняется наложением новых колебаний. Так, смещение в направлении от заряда по горвзонтапьной составляющей сменяется более интенсивным движением в об-Ратную сторону. По вертикальной составляющей после первого максимума скорости также наблюдается новый максимум.

00

1

Сравнение осциплограмм на рис. 80 показывает, что вторичное движение, которое происходит при вэрыве заряда, за вычетом движения в волне сжатия, качественно такое же, как и при сжигании пороха. Об етом, в частности, свидетельствует тот факт, что интенсивность воля при вэрыве эначительно больше, чем при сжигании пороха, что вполке согласуется с теми соотношениями интенсивностей двюжения, которые наблюдаются в центральной зоне, т.е. в самом источнике.

4.2. О природе основных волн. выделяемых на сейсмограммах подземных вэрывов вблизи свободной поверхности

В данном параграфе приведены результаты экспериментальных исспедований волновой картины движения грунта, наблюдаемой в зоне радиусом несколько десятков километров при взрыве зарядов массой от 1 до 1000 т. Основное внимание уделено выявлению природы отдельных волк и механизма их возбуждения. Количественные характеристики параметров воли используются постольху, поскольку они способствуют решению основной задачи.Наиболее подробно рассмотрен вэрыв заряда .вблизи свободной поверхности в сравнительно однородном скальном массиве без наслоения мягкого грунта. Наряду с этим приведены также данные и по взрывам в других грунтах.

4.2.1. Движение поверхности земли в эппцентральной области

Вопрос о взрыве вблизи свободной поверхности целесообразно разделить на две части. Сначала рассмотрим движение грунта, расположенного в эпицентральной зоне, потом - излучаемые волны.

Как уже говорилось выше, процесс движения грунта в эпицентре можно разделить на две фазы. На рис. 81 приведены осциплограммы массовой скорости движения поверхности грунта в эпицентре (а) и в точке, расположенной на уровне заряда на расстоянии 75 м от него (б) при вэрыве заряда массой 150 т на глубине 75 м. Осциллограммы показывают, что во время второй фазы поднятия грунта в эпицентре, начало которой условно отмечено буквой D, в горизонтальном направлении движение практически отсутствует.

Время между моментом выхода волны сжатия на свободную проверхность и началом второй фазы, очевидно, связано с глубиной запожения заряда и скоростью распространения волны сжатия и разгрузки в массшее. Чем больше глубина и меньше скорость волн, тем больше отрезок времени, разделяющий первую и вторую фазы поднятия. В связи с этим интересно отметить следующее. Во-первых, вторичное ускорение грунта на свободной поверхности очень часто начинается гораздо позже, чем следует из времени пробега волны от поверхности до заряда и обратно. Во-вторых, начало второй стадии поднятия грунта на свободной поверхности сопровождается в большкистве случаев довольно резким изломом скорости, что свидетельствует о мгновенном



Рис. 81. Осциллограммы массовой скорости движения поверхности грунта в эпицентре при взрыве заряда массой 150 т на глубине 75 м и в точке, расположенной на уровне заряда на расстоянии 75 M OT HOTO

приложении некоторой силы. Указанные явления связаны, очевидно, с отрывом в впицентре некоторого поверхностного слоя грунта. Это бывает особеяно резко выражено, когда верхний слой представлен мягким грунтом, лежащим на скальном основании. Излом на осциллограммах массовой скорости движения поверхности грунта, отмеченвый буквой D, соответствует соединению слоя с массявом, которое ваступает на второй стадин поднятия грунта над зарядом. Последующее более медленное ускорение свободной поверхности соответствует, очевидно, поднятию споя вместе с основным массивом,

На рис. 82 показаны формы куполов в различные моменты временн при взрыве зарядов массой 1 т в скальном грунте и в глине [15]. Положения купола 1 - 8 при взрыве в скальном грунте соответствуют интервалам времени 12, 17, 25, 31, 39, 44, 52 и 65 мс. Аналогичные интервалы для взрыва в глине равны 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 320, 440 н 540 мс. Поднятие грунта в виде сплошного купола при взрыве в глине проноходит гораздо дольше, чем при взрыве в скальном грунте. Это различке является спедствием того, что глина обладает большей способностью к пластическому течению. Поэтому купол в глине сохраня-



Рно. 82. Формы куполов в различные моменты времени при подземных вэрывах зарядов массой 1 т: а - в скальном грунте на глубине 6 м; б - в глинах на глубине 7 м

ет свою форму без разрушения даже тогда, когда деформации в ней перестают быть упругими. Скапьный же грунт разрушается при гораздо меньших деформациях.

Движение грунта в центральной зоне представляет интерес в основном как источник излучения волн. Повтому наиболее витересны стадин движения, на которых сохраняется связь грунта, полнимающегося в эпицентре, с окружающим массивом. Именно на этих стадиях можно ожидать интенсивную передачу енергии из центральной зоны в окружающий массив, и, спедовательно, только движение на этих стадиях является источником излучения волн. Исходя из етого критерия, который вполне очевиден, нетрупно показать возможную разницу в параметрах излучаемых волн. Действительно, чем продолжительнее поднимающийся купол сохраняет связь с окружающим грунтом, тем большая энергия, при прочих равных условиях, будет излучена в виде волн и тем больше некоторый еффективный период и амплитуда движения грунта в этих волнах. Забегая вперед, можно сказать, что период колебаний грунта в волнах при вэрыве в глине примерно в 3 раза больше, чем при аналогичных взрывах в скальном грунте.

Данные о движении среды в эпицентральной зоне при крупных вэрывах качественно согласуются с аналогичными данными лабораторных исследований. Это показывает возможность распространить модель вэрыва как двойного источника воли, установленную по пабораторным опытам, для объяснения реальных сейсмограмм. Ниже будут рассмотрены наиболее интенсивные волны, выделяемые на сейсмограммах.

4.2.2. Продольная волна сжатия

По своей природе эта волна представляет то же самое, что и аналогичная волна при взрыве в безграничной среде. Особенность продопьной волны сжатия при реальном взрыве вблизи свободной поверх-168



Рис. 83. Осциплограммы массовой скорости движения грунта на расстоянии 245 м от епицентра на различной глубине, равной: а-Ом; б-бм; в-11,4м; г-20м (при взрыве заряда массой 1 т на глубине 12 м)

Вости состоит в том, что она распространяется, как правило, по неоднородной среде. Верхние спои земли представляют в большинстве случаев сножные структуры, и деже при отсутствии явно выраженвой слоистости вблизи свободной поверхности всегда имеется половой слоистости вблизи скорости с глубиной (граднентная среда). Мы рассмотрим наиболее простой случай взрыва в сравнительно одвородной среде (без явно выраженных споев вблизи поверхности). На вородной среде (без явно выраженных споев вблизи поверхности). На втом примере удобно проследить взаимодействие продольной волны скатия со свободной поверхностью, а также изменение характера и вненсивности этой волны при различных глубинах заложения заряда и регистрирующего прибора.

Твличная осциллограмма массовой скорости движения грунта при Взрыва вблизи свободной поверхности показана на рис. 83. Первый максимум на этой осциллограмме соответствует продольной волие сжатя. 169

Таблица 25

2436

Порода	Скорость волны, м/с				
	продольной	разряжения	поперечной		
Песок насьтной естественной впажности	150-200		-		
Суглинок лёссо- видный	500-600	300-330	330		
Гляны синие, пластичные	1800-2000	750-1200	500-900		
Мраморизован- ный кзвестняк	6000-6200	-	2500-2800		
Гранит	5200-5400	4200-4500	2000-2500		

Скорость ее распространения зависит от свойств среды. Измеревные в опытах эначения скорости продольной волны для некоторых пород, в которых производились взрывы, приведены в табл. 25.

На свободной поверхности на некотором расстоянии от вэрыва движение в волне сжатия проявляется преимущественно в горизонтальном направлении (x) и на разной глубине вблизи поверхности практически одинаково по амплитуде. В непосредственной близости от поверхности имеется и вертикальная составляющая движения (z). Для примера в табл. 26 приведены значения максимальных массовых скоростей и перемещений в волне скатия по компонентам x (фаза 1 x) и z при различных глубинах запожения приборов h_{Π} на расстоянии 245 м от епицентра вэрыва заряда массой 1 т. Движение в первом вступлении для x-компоненты в приведенном интервале глубин изменилось незначительнодв то время как амплитуда движения в вертикальном направлении резко упала уже на глубине 6 м.

После положительной и отрицательной фаз в волне сжатия, которыми в безграничном массиве практически ограничивается все движение, вблизи свободной поверхности наблюдаются иногда многофазные колебания. Следует отметить, что даже при одном и том же вэрыве, но в различных точках регистрации интенсивность колебаний после волны сжатия бывает различной, что определяется наличием в точках установки приборов определенных структур грунта.

Максимальная скорость движения грунта в продольной волне сжатия, распространяющейся вдоль свободной поверхности, согласно данным эксперимента, убывает с расстоянием по тому же закону, что и в безграннчном массиве, т.е. ее затухание может быть выражено формулой (12) для камуфистного вэрыва. В связи с этим важно подчеркнуть следующее. Влияние свободной поверхности практически не сказывается на законе затухания волны сжатия. Тот факт, что затухание волны сжатия при распространении вдоль свободной поверхнос-170

Таблица 26

ћ _п , м	V X' CM/C	V2, CM/C	w _x , мкм	W _Z , MKM
0	1,4	1,4	120	110
6,0	0,9	0,4	108	37
11,4	0,8	0,5	110	33
20,0	0,9	0,3	120	22

ти не увеличивается, означает, что разгрузка от этой поверхности даже при небольшом: заглублении прибора всюду приходит в точку измерения в то время, когда положительная часть волны скатия уже практически заканчивает свое воздействие в этой точке, т.е. волна разрузки имеет меньшую скорость распространения, чем волна сжатия.

Различие в скоростях распространения воли сжатия и разрежения является, очевидно, следствием естественной трешиноватости и неоднородности пород и, следовательно, неодинаковых упругих характеристик среды при сжатии и растяжении. На ето, в частности, указывают и результаты непосредственных измерений модулей растяжения $E_{\rm B}$ и сжатия $E_{\rm CR}$ некоторых пород (табл. 27).

Таблица 27

Породы	E _D /E _{CX}	E _{N3F} /E _{C X}
Глинистые сланцы	0,3 - 0,9	0,3 - 0,5
Песчанистые сланцы	0,3 - 0,4	0,3
Песчаники	0,2 - 0,9	0,3 - 0,9

4.2.3. Волна разрежения

Волной разрежения считается волна, которая образуется в епщентральной зоне на второй стадии взрыва (второй источник). Выделение на осциплограммах момента вступления волны разрежения в отдельные точки часто затруднено тем, что вступление этой волны происходит на фоне движения грунта после волны скатия. Наиболее четкой фазой волны разрежения является максимум скорости движения или максимум перемещений грунта в сторону взрыва. Этот максимум на осциплограммах скорости обозначен 2х. После смещения грунта в сторону взрыва наблюдается обратное движение. На осциллограммах фаза 2х соответствует максимуму скорости обратного движения. В целом движение грунта в волне разрежения является низкочастотным по сравнению с движением в продольной волне сжатия.

243



Рис. 84. Осциппограммы перемещении на расстоянии 1500 м при подземном взрыве заряда массой 150 т на глубине 75 м: 1-движение на свободной поверхности; 2-движение внутри массива на глубине 110 м

Значения скорости распространения волны разрежения в некоторых породах, измеренные непосредственно по осциллограммам (скорость фаз 2х и 2х), приведены в табл. 25. Прямые измерения скорости волны разрежения показали, что деформации растяжения в реальных породах действительно распространяются заметно медленнее. чем сжимающие деформации. Эта разница особенно заметна в грунтах нескального типа. Согласно данным табл. 25, в глине скорость волны разрежения примерно в 2 раза меньше скорости продольной волны сжатия. Такое большое различие в скоростях приводит к тому, что волна разрежения уже на сравнительно малых расстояниях отделяется от продольной волны сжатия и отчетливо проявляется как самостоятельная волна (рис. 84). Интересно отметить, что при взрывах в глине зарядов разной массы скорость волны разрежения не остается постоянной (табл. 28). При увеличении массы заряда от 0,1 до 10 т скорость непрерывно увеличивалась, а при дальнейшем росте мощности взрыва скорость оставалась неизменной. Зависимость скорости распространения волны разрежения в глине от массы заряда, по всей вероятности, объясняется несднородностью среды. Верхние спои глин, в которых производили опыты, были выветрены и характеризовались меньшими значениями скоростей продопьных волн сжатия. Поскольку более мелкие варывы сроводили на меньшей глубине, то к скорость волны разрежения при этих вэрывах оказалась меньше.

Движение грунта в волне разрежения, как видно из рис. 83, происходит преимущественно в горизонтальном направлении. Однако вблизи свободной поверхности в волне разрежения имеется также и вертикальная составляющая движения, близкая по величине к радиальной составляющей. Вертикальная составляющая скорости довольно быст-

2436

Таблица 28

Масса, заряда, кг	Скорость волны раз- режения, м/с	Скорость поперечной волны сжатия, м/с
10 ²	750	330
10 ³	900	500
104	1250	700
106	1250	900

ро затухает с глубиной, а скорость в горизонтальном направлении по глубине (до 20 м) практически не меняется. Отсутствие затухания с глубиной движения в горизонтальном направлении свидетельствует о том, что это движение охватывает значительную часть массива. Быстрое же затухание движения вертикальной составляющей по глубине свидетельствует о поверхностном характере этого движения. Появление 2-составляющей обусловлено, как и в продольной волне скатия, наличием свободной поверхности. Интересно отметить соотношение между дляной волны и толциной слоя, в котором наблюдает-Ся поверхностное движение. Так, при взрыве заряда массой 1 т толщина этого слоя составляет не более 20 м, в то время как длина волны разрежения при этом взрыве более 300 м. Это значит, что влияние свободной поверхности сказывается на очень незначительной глубине, которая намного меньше длины волны. Это положение справедливо и при увеличении масштаба вэрыва. Так, при вэрыве заряда массой 150 т вертикальная составляющая в волне разрежения на глубине 110 м практически отсутствует, в то время как радиальная составляющая почти не изменилась (см. рис. 84). Длина волны при етом более 1000 м, т.е. влияние свободной поверхности и при этом вэрыве сказывается на сравнительно небольшой глубине.

Максимальная скорость движения грунта (см/с) в волне разрежения убървает с расстоянием по эакону

 $v = K \left(\frac{\varrho^{1/3}}{R}\right)^{1/7}$ (78)

Показатель степени в этой формуле одинаков для различных грунтов и по своей величине близок к показателю степени в формуле (12) для волны скатия. Наличие одинаковых законов затухания с расстоянием у воли скатия и разрежения означает, что волна разрежения имеет сферическую расходимость фронта и переносит внергию равномерно по всем направлениям. На это же указывает устойчивая форма движения грунта в волне разрежения на различных расстояниях от епицентра: оно всюду начинается смещением грунта в направлении к вэрыву.

Корфригиент К в формуле (78) является постоянной величниой,



ADDRESSEE OF THUS INVEL, TWO, MATCHING, INF INSTRUCTU STOTTS AN ADDRESS, E INF THE TIC, PARAMANA & ADDRESS LOBORIZATION & MANAGER, MANAGER INTEREM JUST, MIN & MANAGER, TOTTS I BULTY DESPENDENT DEPARTMENT INTERE INTER ORIGINE.

THE PRESENCE ADDRESS TO THE I THE DESDERVICE & MADINE PARTY I BELLEY DEPERSONNEL, PRESERVE, ERENERAL E THE KOTOPOLO FOTT, DOLD CALL I B WILLETPERFORCE SORE, SICHER SE C DEDTRACTION MECTERAL TOI 35-TTO DEPRON NORFARTS TOTE 1 BUCH DESPERANCE SAME AT IT INTERS TTO THERE HOLTH I CHOOSEN STERE порметия, Принеленные на то 22 ж-MA LY-WIA HORBERSET, TT ENCOME TELEDE RIENE LYNDI DELEDERETE SEE TARK WINNERS HIM BERNEY & MALEN ------THE FROM FIRE TRADE AND THE PARTY OF MAL TH PASPERENES B THERE ITS := 1 :

W IN SIDE ALIEND TO BE MOLENCIA, STO P 3 TIE, THE SIDE ALIENT STATES IN THE STORE ALIENT STATES AND ALIENT AND ALIENT AND ALIENT AND ALIENT AL

The second seco

The second second state and the second state of the second second

T+ FIF ;

TON: TOUGH

 $T = 600^{-0.21}$

Эти формулы являются эмпирическими и справедливы для зарядов массой от 1 до 1000 т. Они показывают, что период колебаний в скальном грунте меньше, чем в глине. Чрезвычайно интересным является тот факт, что с увеличением модности взрыва разница в величинах периодов уменьшается. Так, например, при взрыве заряда массой 1 т период колебаний в глине примерно в 3 раза больше, чем в граните, в то время как для зарядов массой 1000 т разница составляет 70%. При дальнейшем увеличении модности взрыва эта разница, по всей вероятности, будет еще меньше. Выравнивание периодов колебаний грунта в волне разрежения при взрывах в различных средах с увеличением мощности взрыва квляется, по-видимому, спедствием возрастания роли силы тяжести на процесс вслучивания.

4.2.4. Поперечная волна

Под поперечной волной 1 s подразумевается та волна, которая наряду с волной разрежения образуется на второй стадии взрыва вблизи свободной поверхности в результате вспучивания грунта в епицентральной зоне. Следует отметить, что факт существования этой волны постулируется, исходя из описанных выше характеристик движения среды в центральной зоне. Это допущение представляется вполне погичным, так как сдвиговые напряжения при сложном деформировании среды также неизбежны, как и объемные. Именно исходя прежде всего из этих основных возможных типов деформаций и, следовательно, воли ведется расшифровка волновой картины при взрыве.

Волна s₂ вблизи поверхности земли проявляется на вертикальной *z* и радиальной *x* компонентах. На осциллограммах отдельные фавы движения грунта в поперечной волне обозначены цифрой 3 с соответствующими значками.

Значения скорости поперечной волны, измеренные для некоторых типов грунта, приведены в табл. 25. Отношение скорости поперечной волныг с_в к скорости продольной волны с_р во всех исследованных случаях не превышает 0,5 и в отдельных случаях составляет 0,25 – 0,3. В табл. 28 приведены значения скорости распространения поперечных воли около свободной поверхности при различных масштабах взрыва в глине. Возрастание скорости с увеличением массы заряда вызвано тем, что более мощный взрыв производится соответственно на большей глубине, а среда является градиентной.

 Плоская поперечная волна с аналогичным движением в сейсмопогии обозначается через sy. Здесь введено новое обозначение, поскольку рассматриваемая волна не является плоской.

175

(80)



Рис. 86. Траектория движения частиц грунта вблизи свободной поверхности на расстояния 245 м от епицентра вэръва заряда массой 1 т на глубине 12 м при прохождении сейсмических воли: 1-1-волна сжатия; 2-2волна разрежения; 3-3 – поперечная волна

Преимущественной составляющей пвижения групта в волне з_ является вертикальная компонента. Осшиллограммы (см. рис. 83 и 84) показывают. что при вэрывах зарядов массой 1 и 150 т максимальные амплитуды движения грунта вверх на глубине соответственно 20 и 100 м оказались практически такими же, как и на свободной поверхности. Взаимодействие поперечной волны со свободной поверхностью приводит, как и в случае волн продольной и разрежения, к появлению некоторого дополнительного движения в поверхностном спое. Наряду с основным движением в вертикальном ваправлении появляется радиальная (горизонтальная) компонента, причем на самой свободной поверхности вертикальная и радиальная компоненты близки по величние. С глубиной горизонтальная компонента быстро затухает, и при глубине, намного меньше длины волны, в поперечной волне практически остается только вертикальная составляющая движения час-

тни грунта в поперечной волне. Вблизи свободной поверхности траектория напоминает форму эллипса, по которому частицы двигаются в направлении против часовой стрепки (рис. 86).

Движение грунта в поперечной волне з, по своему низкочастотному характеру напоминает движение грунта в волне разрежения. Период колебаний грунта в поперечной волне на небольших расстояниях от заряда всегда равен периоду колебаний грунта в поперечной волне разрежения, причем ето равенство сохраняется в очень большом диапазоне изменения абсолютных значений величины периода. Так, при вэрыве заряда массой 1 т в скальном грунте период колебаный равен около 0,07 - 0,08 с, а при взрыве заряда массой 1000 т в глине - более 1 с. Несмотря на большое различие в усповнях проведения вэрывов (разные породы и масса зарядов), относительное равенство периодов в поперечной волне и волне разрежения всегда сохраняется. Одинаково также эти волны реагируют на изменення глубины запожения заряда (см. рис. 85). Все это подтверждает, что указанные типы волн имеют единый источник возбуждения. Все закономерности, которые были установлены для периода колебаний в волне разрежения, кроме зависимости периода от расстояния, полностью применимы и для периода колебаний в поперечной волне.

Интересной особенностью поперечной волны по сравнению с волной разрежения является распространение ее по некоторому слою вблизи свободной поверхности. Это свойство поперечной волны вытекает из механизма ее возбуждения. В качестве дополнительного доказательства возможности покализации енергии поперечной волны в некото-

00 .

1

ром спое можно привести данные работы [64]. В ней показано, что распределение внергии, переносимой поперечной волной, в основном определяется характером источника, т.е. будучи возбужденной в некоторой зоне эплиптической формы поперечная волна длительное время распространяется преимущественно по направлению вдоль малой оси вллипса. Распространение в некотором спое обусловливает ряд особенностей, присущих только поперечным волнам, в отличие от объемных воли со сферической расходимостью. Одной из таких особенностей является сравнительно медленное затухание амплитуды поперечной волны с расстоянием. Если представить закон изменения амплитуды поперечной волны с расстоянием в виде одночлевной степенной функции вида у ~1/R^m, то показатель m колеблется от 1 до 1,5, причем не замечено существенной разницы в величине т для различных грунтов. Пределы изменения значения т обусповлены в основном большим разбросом экспериментальных значений параметров поперечной волны. Напомним, что при наличии сферической расходимости фронта волны m = 1,7-2,0, т.е. больше, чем для поперечной волны.

Абсолютные значения параметров поперечной волны зависят от свойств грунта. Так, например, максимальная массовая скорость в глине примерно в 2,5 раза больше скорости в скальном грунте. Еще большее различие наблюдается в максимальных перемещениях.

4.2.5. О волне Релея

Волновую картину, наблюдаемую при вэрьвах в блюжней зоне, в основных чертах можно объяснить действием только продольных и поперечных воли, не принимая во внимание поверхностную волну Релея, хотя на осциплограммах волны, обладающие признаками этой волны, проявляются довольно отчетливо. При расшифровке осциплограмм вэрывов за волну Релея очень часто принимают колебания грунта, вызванные, по нашему мнению, поперечной волной s_z . Причиной такой неоднозначности трактовки является то, что поперечная волна вспедствие специфических особенностей ее возбуждения, имеет некоторые признаки, которые формально позволяют отнести ее к волнам поверхностного типа. Однако по существу поперечная волна s_z не имеет ничего общего с поверхностной волной Релея.

Как извастно, впервые возможность образования поверхностных воли была высказана Релеем в 1887 г. на основе теоретического решения задачи об установившемся стационарном колебании упругого полупространства. Анализируя эти колебания, Релей обнаружил, что вблизи свободной поверхности наблюдается некоторое движение, которое носит поверхностный характер и обусловлено наличнем поверхности, свободной от нормальных напряжений. Он указал на некоторые признаки этого движения и по аналогии с поверхностными волнами в воде высказал гипотезу о возможном существования воли поверхностного типа вблизи поверхности земли.

При расшифровке сейсмограмм землетрясений и взрывов действительно были обнаружены колебания, которые имеют ряд признаков,

23-1

указанных Репеем. Оня были названы поверхностной волной Репея. Однако в настоящее время нет ясного представления о механизме образования поверхностной волны Репея при возбуждении колебаний таким нестационарным источником, каким является вэрыв.

На примере трех основных типов волн было показано, что наличие свободной поверхности, в полном соответствии с теорией, приводит к появлению некоторого поверхностного движения, которое имеет черты колебания, исследованного Релеем. Так, например, это движение быстро затухает с глубиной. Траектория частиц вблизи поверхности в каждой волне по форме близка к эплипсу, а в поперечной волне s частицы движутся в направлении против часовой стрелки. Все эти факты свидетельствуют о том, что наблюдаемое поверхностное движение аналогично тому, которое рассматривал Релей. Источником поверхностной волны Релея может быть, очевидно, именно это движение. Однако поскольку оно наблюдается при прохождении всех волн, то, следовательно, каждая из них может быть источником возбуждения поверхностной волны Релея.

Поверхностную волну Релея можно представить как некоторое инерционное движение, которое сохранится в поверхностном слое после прохождения объемных волн и затем будет передаваться в этом слое от одних частиц грунта к другим в виде самостоятельной волны, Поскольку поверхностное движение возбуждается в каждой точке свободной поверхности, то, следовательно, каждая точка может быть ноточником излучения поверхностной волны. Отсюда вытекает, что поспе каждой волны движение в некоторой точке длятельное время Должно продолжаться за счет прихода в нее поверхностных волн из Однако в опытах такого явления не наблюдается. предыдущих точек. Если на свободную поверхность выходят коренные породы, то прак-ТИЧЕСКИ НИКАКОГО ИНЕОЦИОННОГО ДВЯЖЕНИЯ ГРУНТА ПОСЛЕ ПОСХОЖДЕНИЯ объемных воля нет. После завершения движения в основной волне. которая является возбудителем колебаний свободной поверхности. пректически сразу же исчезают и колебания поверхностного споя. Сравнительно интенсивные и продолжительные инерционные колебания грунта наблюдаются только в том случае, если верхний слой плохо связан с основным массивом. Благоприятным случаем для возбуждения вблизи свободной поверхности этих колебаний является слой мягкого грунта, лежащого на скальном основании. В втом случае, как правило, после прохождения каждой волны наблюдается повольно длительное колебание верхного слоя. Сохранение колебаний в верхном слое вызвано том, что энергия этих колебаний оказывается ках бы "запертой" в пределах слоя и поглощается в ограниченном объеме грунта.

Таким образом, на сейсмограммах вэрывов в ближней зоне вынепяются три основные волны, которые излучаются непосредственно из центральной зоны и которые объясняют основные черты волновой картины. Что же касается самостоятельных поверхностных волн, типа волны Релея, то они фактически не наблюдаются. Наблюдаемые на сейсмограммах инэкочастотные колебания, которые часто интерпретируются как поверхностные волны, обусловлены в действительности

Ø

ത

24

C

C

C

особенностями взрыва вблизи свободной поверхности, являющегося двойным источником излучения воли.

4.3. Характер волновой картины при создании в среде спентовой деформации на ограничениом участке плоскости

Изучение взрыва привело к созданию представления о том, что излучение сейсмических воли происходит в два етапа. И если первый етап можно характеризовать как действие центра расширения, то второй етап обусловлен процессом поднятия породы в елицентральной зоне. Схематично второй етап можно представить как взаимодействие некоторого объема породы, которому сообщено направленное движение в сторону свободной поверхности, с окружающим массивом. При етом взаимодействии возбуждаются сдеиговые и объемные волны. В целях более глубокого понимания вэрьва, как источника излучения, сейсмических волн, а также и естественных очагов землетрясений, можно попытаться искусственно упростить очаг возбуждения волн с тем, чтобы на етих упрощенных моделях более наглядно провести корреляцию между процессами в очаге и волновой картиюй.

Изучение механизма очагов землетрясений привело к созданию определенных представления об очаге. Общепринятой является точка зрения, согласно которой источником сейсмических воли является упругая энергия, накапливающаяся в недрах Земли [8, 46, 70]. При разрушении вещества в очагах землетрясений происходит замена одного равновесного состояния другим, а накопленная до этого упругая энергия излучается в виде воли. Сам же процесс относительного движения частей массива в зоне разрушения в существующих представлениях не считается источником возбуждения волн. хотя достаточно надежных количественных оденок параметров этого процесса сделано не было. Вместе с тем справедливость такого пренебрежения не кажется очевидной. Действительно, предел накопления упругой энергии определяется прочностными свойствами среды. Для большинства горных пород предел прочности измеряется сотнями атмосфер. В процессе же относительного смещения вещества земли вдоль плоскости разрушения приходится преодолевать значительные силы трения, обусловленные наличием гидростатического давления, которое на глубине около 10 км составляет (2,5 + 3,0) 108 Па. С увеличением глубины это давление непрерывно возрастает, в то время как прочностные характеристики массива такой непрерывной корреляции с глубиной не имеют. Легко представить, что в процессе проскальзывания двух частей массива друг относительно друга, сжатых высоким давлением, возможно образование в окружающем массиве интенсивных волн.

Ниже рассматривается процесс возбуждения волн при создании в среде быстрого сдвига, который может реализоваться в очагах земпетрясений при проскальзывании вещества вдоль плоскости разрушения.

Опыты проводили в лабораторных условиях. Схема опытов показа-

23-2

00

TN


Рис. 87. Схема возбуждения вола при сдвиге на ограниченном участке поверхности:

I – область возбуждения сдвяга; II, III – первоначально невозмущенные области; 1 – пластина из гетинакса; 2 – направление удара по пластине; 3 – точки установки датчиков

на на рис. 87. Волны возбуждались в плоском блоке размером 810 × × 560 × 100 мм, отлитом из пластилина. Для создания сдвиговой деформации использовали пластину из гетинакса размером 150× 100× ×20 мм, которую в разогратом виде прикладывали к торцу блока. После остывания пластина оказывалась прочно скрепленной с пластилином. Удар по торцу пластины, который возбуждал в блоке сдвиговую деформацию, производили с помощью свободно падающего металлического шара. Из схемы опыта видно, что в блоке пластилина на ограниченном участке поверхности создается сдвиговая деформация, которая затем в виде воли распространяется по блоку.

Параметры воли измеряли с помощью индукционных датчиков, регистрирующих массовую скорость среды, показания которых записывали на катодном осциллографе ОК-27 М. Датчики устанавливали в лунки на поверхности блока и запивали расплавленным пластилином, что обеспечивало надежный контакт датчиков с окружающей средой. Первоначально производили регистрацию трех компонент движения среды. Опыты показали, что движение происходит преимущественно в плоскости блока (z x). Составляющая скорости (y), перпендикулярная к плоскости блока, на порядок меньше. Поэтому весь анализ волновой картины оказалось возможным производить только по двум составляющим: z и x.

Осциплограммы вертикальной составляющей скорости движения пластины и среды в точках блока, расположенных на различных расстояниях от плоскости сдвига по пиние *MN*, проходящей через середину пластицы, показаны на рис. 88. За положительное направлеище оси z взято направление удара (вниз), а оси x - направление распространения волны (влево от пластины). Поэтому на осциллограм-

180



Рис. 88. Осинплограммы вертикальной составляющей скорости движения вещества в различных точках

мах рис. 88 и последующих рисунков отклонение лучей вверх соответствует движению среды вниз (на z -составляющей) и от пластины влево (на составляющей).

Из осциплограмм видно, что движение среды в точках, примыкаюших к пластине, по характеру совпадает с движением пластины. Годограф фазы, соответствующей максимуму скорости вниз, приведен на рис. 89. Этот максимум распространяется со скоростью 305 м/с. Скорость продольных воли, измеренных в блоке независимо, равна 600 ± 30 м/с. Ссотношение скоростей показывает, что максимум скорости вниз связан с поперечной волной. По мере удаления от первоначальной плоскости сдвига характер движения среды усложияется. Начиная с расстояния 160 мм вдоль линии МЛ, направление первоначального смещения меняется на обратное. Движению в поперечной волне вниз предшествует смещению вверх. Годограф начала первого вступления показав на рис. 89. Он соответствует скорости 610 м/с. Эта реличина совпадает со скоростью распространения продольной волны.

Таким образом, при возбуждении сдвига вдоль некоторой ограни-



Рис. 89. Годографы продольной (1) и поперечной (2) волн

ченной площадки в среде образуется не только поперечная волна, но и объемная. Механизм возбуждения этой волны не очевиден. Можно предположить, что она возникает наряду с поперечной волной прямо на контакте "пластина-пластилин" за счет волн в самой пластине или ее перекоса в процессе движения после удара. Вторым вероятным источником объемной волны является поперечная волна. Вааимоцействие среды, рас-

положенной в области / (см. рис. 87) и приведенной в движении при сдвиге пластины, с первоначально невозмущенной средой в областях II и III может быть источником возбуждения объемных воли. Чтобы выяснить действительный механизм, рассмотрим более подробно характер движения среды.

На рис. 90 показаны осциплограммы вертикальной и горизонтальной составляющих скорости движения среды в различных точках блока. Наиболее интересным является поведение х -составляющей скорости. В точках, расположенных внопь линии MN (рис. 91), которая проходит через середину пластины, х -составляющая скорости близка к нущо. Выше этой линии первое движение направлено к пластине (минус): нике линии - в обратном направлении (плюс). Скорость распространення первого вступления на к-составляющей совпалает со скоростью распространения первого вступления на z - составляющей и соответствует скорости продольной волны. Отсюда следует, что первое пвижение на x -составляющей выше линии MN обусповлено прохождением волны разрежения. а ниже линни - волны сжатия. Наиболее отчетливо такой характер волн наблюдается в точках на расстоянии свыше 90 мм (рис. 90, б,в). В непосредственной близости от пластины (рис. 90, а) движение на х - составляющей более сложно. Наряду с сравнительно низкочастотным движением, которое на расстояниях свыше 90 мм является единственным, видна более высокочастотная составляющая. Эта же составляющая движения видна и на осциплограмме скорости самой пластины (см. рис. 90, а). Низкочастотное двюжение на пластине также заметно и имеет направление, совладающее с аналогичным направлением движения частщ в блоке : в середние пластины низкочастотная составляющая практически не выделяется, верхний конец пластины имеет отрицательную у -составляющую низкочестотного движения, а нижний - положительную к -составляющую. Анализ движения среды в горизонтальном направлении показывает. что низкочастотная составляющая является основной. Высокочастотная компонента быстро затухает и ее практически можно не учитывать. Она обусловлена, очевидно, колебаниями в самой пластине и несет небольшой запас энергии.

В табл. 29 приведены максимальные скорости на z - и x - сос-182



Рис. 90. Осциплограммы вертикальной (сплошная линия) и горизонтальной (штриховая линия) составляющих скорости в отдельных точках, расположенных вдоль вертикальных линий: z -расстояние точки от верхного края блока пластилина; z-расстояние от боковой грани блока, вдель которой производили сдвиг, равное 25 мм (а), 160 мм (б) и 560 мм (в)



Рис. 91. Распределение по блоку горизонтальной составляющей скорости движения среды в объемных волнах

тавляющих в точках, расположенных вдоль двух линий. Скорости нэмерялись в точках, расположенных примерно на уровне верхнего (z = 220 мм) и нижнего (z = 390 мм) краев пластины. Из табл. 29 видно, что на пластине вертикальная составляющая превосходит горизонтальную примерно в 6 раз, в то время как в точках блока пластилина это соотношение заметно меньше (2,5 - 3,4). Такая разнща в соотношении показывает, что движение на и -составляющей в блоке непосредственно не связано с горизонтальным движением пластины. Приведенные данные косвенно указызают на то, что образование продольных волн сжатия и разрежения в блоке пластилина не связано с дыжением пластины. Чтобы окончательно в этом убедиться, были проведены дополнительные опыты. Пластина в этих опытах одновременно возбуждала волны в двух блоках, между которыми она располагалась. Идея опыта состоит в следующем. Если движение на z -составляющей в точках блока обусловлено горизонтальной составпяющей движения пластины, то тогда в симметричных точках, расположенных в разных блоках, первое смещение будет иметь разные знаки. Если же все движение среды обусловлено сдвиговой деформацией блоков на контакте с пластиной, то тогда двюжение в

184

Таблица 29

			K	ордина	ra x	TOURN (num) up					
Показатели		5	220					II Ni	390			
	0	25	90	160	280	560	0	25	80	160	280	560
Максимальная ско- рость на x-состав- ляюшеž, см/с	-13	-14	I	Ŷ	I	4	89 +	+1.4	11+	2+	نې +	Ŷ
Максимальная ско- рость на z -составия- кощей, см/с	60	+51	. +18	+1,9	+11	2+	+59	38	+23	+17	+13	8) +
Отношение ^v z	4,6	3,6	I	3,2	I	3,5	7.4	2,7	2,1	2,4	2,6	1,3

2436

185

•

.



Рис. 92. Осциплограммы скорости дыжения вещества в симметричных точках. расположенных в двух блоках, с координатами: a - z = 10 мм; x = -60 мм; 6 - z = 10 мм, x = 60 мм; B - z = -280 мм; x = -280 мм;

обоюх блоках должно быть одинаково направленным по отношению к пластине.

На рис. 92 приведены осциллограммы скорости в симметричных точка, расположенных в разных блоках. Отклонение лучей вверх соответствует движению вниз на *z* -составляющей, и в направлении от пластины на *x*-составляющей. Характер осциллограмм в симметричных точках, как видно из рис. 92, практически одинаков.

Таким образом, можно считать установленным, что при создании сдвиговой деформации вдоль некоторого ограниченного участка плоскости в среде возбуждается не только поперечная волна, но и две объемные волны. Граница между областями их распространения проходит по плоскости *NN* (см. рис. 87), которая перпендикулярна к плоскости сдвига и проходит через середину участка, на котором создается сдвиговая деформация. Излучение объемных воли происходит, очевидно, в процессе своеобразного распада первоначального фосита 186



Рис. 93. Распределение максимальных эначений вертикальной составляющей скорости в поперечной волне вдоль линий на расстоянии от края блока;

а = 560 мм; б = 280 мм; в = 160 мм; г = 90 мм; д = 25 мм

поперечной волны. Первоначально сдвиговая деформация охватывает вертикальный слой среды в области 1, который непосредственно соприкасается с пластиной. В силу связности среды движение от этого слоя передается не только к соседнему вертикальному слою за счет сдвига, но и в области II и III. На границе областей I и II расстояние между соседними частицами увеличится, в результате чего в возникнет волна разрежения. Вблизи гранщы областей I, области II III, наоборот, расстояние между частицами уменьшится, и в области III образуется волна сжатия. Наряду с указанными объемными волнами в области II и III передаются также и сдвиговые деформации. Вблизи границ области / объемные и сдвиговые деформации вступают одновременно и постепенно расходятся во времени по практически мере распространения вопн. С этим связаны изменения формы первоначального импульса в областях // и ///, которые видны на осциллограммах рис. 90. Импульс скорости в этих областях вначале растягивается во времени, а затем приобретает четко выраженную двухгорбую структуру.

На рис. 93 приведены распределения максимальных амплитуд вертикальной составляющей скорости в поперечной волне (направленной вниз) на различных расстояниях от пластины. Первоначально четкая граница между областями *I-II* и *I-III* постепенно размывается.

24-2

2436



Рис. 94. Схема возбуждения объемных воли при распространении поперечной волны:

1-область преимущественного распространения өнергин полеречной волны; 2-условная граница, на которой поперечная волна возбуждает волну сжатия; 3 - условная гравкца, на которой поперечная волна возбуждает волну разрежения Это значнт, что граница, на которой происходит возбуждение объемных волн. для области II смещается вверх от горизонтальной плоскости, а для области IIIвниз. Схематично это показано на рис. 94. В заштрихованной области вертикальная составпяющая движения в объемных волнах направлена вверх. т.е. она противоположна направлению смещения в поперечной волне, в TO BOOMS KAK BLUE E HOKE BTOR области они совпадают. Это явление хорошо видно на осциллограммах (см. рис. 90) и на рис. 95, на котором показано распределение вертикальной составляющей скорости в объемных волнах. Очевидно, поперечная волна в пропессе распространения в течение некоторого времени непрерывно излучает

объемные волны, в результате чего ее фронт из плоского становится расходящимся. Поскольку амплитуда поперечной волны и градиенты скоростей вблизи границы области ее распространения уменьшаются с расстоянием, то интенсивность излучаемых продольных волн также убывает по мере распространения поперечной волны. По-видимому, можно выделить некоторую вффективную зону вблизи первоначальной площади сдвига, в пределах которой излучается основная часть энергии продольных волн. Эту зону и надо рассматривать как очаг излучения продольных волн. Ее размеры, по-видимому, существенно превосходят размеры первоначальной площадки сдвига. На это, в частности, указывает изменение длительности движения в продольных волнах, предшествующих вступлению поперечной волны. Из осциллограмм на рис. 88 и 90 видно, что вта длительность непрерывно увеличивается с расстоянием и достигает значений, в несколько раз превосходящих время развития первоначального сдвига.

Явление излучения продольных воли при распространении поперечных воли представляет интерес с точки зрения исследования механизма формирования дликнопериодных воли вблизи от очага возбуждения сдвиговой деформации. Оно номогает также понять и процесс формирования многофазного цуга колебаний. Так, например, при подземном взрыве в процессе куполообразного поднятия грунта вблизи свободной поверхности возбуждается поперечная волна. Первоначальное движение среды в этой волне, в полном соответствии с движением в источнике, направлено вверх [60]. Однако по мере распространения волны вдоль поверхности перед максимумом скорости вверх появляется движение вниз. Происходит своеобразное формирование

188





новых фаз движения, которые распространяются быстрее максимума скорости в поперечной волне. Первоначально простой импульс постепенно превращается в многофазное колебание, причем новые фазы появляются не только перед основной фазой движения в поперечной волне, но и после нее. Наблюдаемое изменение характера движения можно объяснить явлением излучения объемных воли в процессе распространения поперечной волны, первоначально возбужденной в некотором поверхностном слое грунта.

Аналогичные явления при землетрясениях должны быть, очевидно, выражены более резко вспедствие характера самого очага.

На рис. 96 приведены характерные осциллограммы смещения поверхности земли, наблюдавшиеся при афтершоках ташкентского земистрясения [73]. Волне, несущей максимальную амилитуду смещения, предшествует вступление, вызывающее движение в потивопопожную сторону. По своему характеру это движение совпадает с движением среды, наблюдавшимся в пабораторных опытах (заштряхованная область на рис. 94).

Таким образом, при создании сдвиговой деформации вдоль ограниченной площадки возбуждается не только поперечная волна, но и продольные волны сжатия и разрежения. Области распространения продольных воли разных знаков разделены плоскостью, перпендикулырной к границе полупространства и проходящей через середину площад-



Рис. 96. Сейсмограммы в эпидентральной области при ташкентском землетрясении:

а - основной толчок; б - афтершок

ки возбуждения первоначального сдвига. Нетрудно представить, что при аналогичном сдвиге внутри безграничной среды все пространство вокруг очага разделится на четыре части, каждая из которых будет характеризоваться определенным энаком вступления продольных волн. Это значит, что вокруг такого очага будет квадрантное распределение знаков первых вступлений объемных волн, которое имеет место и в спучае, если движение в очаге вдоль плоскости сдвига происходит под действием релаксирующих упругих напряжений [46]. Разница будет только в том, что знаки воли в квадрантах будут противоположными. И хотя этот результат с точки эрения теории упругости представляется, по всей вероятности, очевидным, тем не менее в явном виде для случая сдвига произвольной интенсивности он получен в нас-

тоящей работе, по-видимому, впервые. Он может изменить представпения о механизме очагов и источниках энергии землетрясений.

4.4. О механизме вэлучения воли в очагах землетрясений

Сейсмические колебания возникают не только при вэрывах, представляющих искусственные очаги возбуждения. Наиболее разрушительное действие вызывают естественные землетрясения. Общая схема возбуждения волн при землетрясениях такая же, как и при вэрывах; в некоторой ограниченной области, называемый очагом, выделяется энергия, которая сатем рассенвается в окружающий массив в виде ' сейсмических волн. Основное различие между взрывом и землетрясением состоит в источниках энергии и конкретных способах ее выделения.

4.4.1. О модели очагов землетрясений

В основе представлений об источниках энергии сейсмических волн запожен так называемый <u>механизм упругой отдачи</u>, предложенный в 1911 г. Рейдом [5]. Существо его состоит в том, что в твердой оболочке Земли постепенно накапливаются деформации. При определенной величине их происходит разрушение среды, а энергия упругой части деформаций вблизи очага разрушения освобождается и излучается в виде воли. Вопрос о конкретных силах, которые вызывают деформирование среды, и об их пространственно-временном распределении остается и в настоящее время до конца не ясным.

В наиболее общем виде процессы в очаге представляются в спедующем виде [8]. В среде выделяется некоторый объем, на поверхности которого задана система внешних сил, уравновешенная напряжениями в среде внутри объема. Они образуют поле внешних напряжений. При появлении внутри объема площадки разрыва равновесие нарушается, а через некоторое время вновь восстанавливается. Изменение энергии внутри объема определяется изменением энергии поля внешних напряжений и работой внешних сил. Если работа равна нупю, то выцеление энергии внутри объема возможно только за очет уменьшения запаса внутренней энергии поля упругих деформаций. При появлении поверхности разрыва среды межатомные связи нарушаются. и на ней освобождается упругая энергия поля внешних напряжений. Часть этой энергии идет на перемещение среды вблизи поверхности ' разрыва и образование собственного поля напряжений, которое включает волновое поле и поле статических напряжений. Другая часть освободившейся энергии тратится на необратимые процессы в области разрыва.

В существующих представлениях источником энергии сейсмических воли считается как раз энергия собственного поля напряжений. При этом работа внешних сип, приложенных к поверхности рассматри-

191



Рис. 97. Схема возбуждения воли при относительном сденге вещества внутри массива вдоль некоторой площадки: 1-участок, вдоль которого происходит сденг; 2-направление сденге; 3-знаки первых вступлений продольных воли; 4 – плоскости, разделиющие все пространство на четыре квадранта; 5-свободная поверхность

ваемого объема, принимается равной нулю и не рассматривается в качестве возможного источника излучаемой энергии. Справедливость такого предположения трудно проверить непосредственно расчетом процессов в очаге, поскольку для этого необходимо знать конкретные физические причины деформирования ведества внутри рассматриваемого объема, а они, как отмечалось выше, не известны. Однако можно попытаться оценить роль работы внешних сил косвенно на основе анализа волновой картины землетрясений при условии зедания конкретной физической природы втих сил.

Наиболее характерной особенностью волновой картины при землетрясениях является квадрантное распределение воли сжатия и разрежения вокруг очага. Согласно теории упругости такое распределение может быть при снятии упругих сдвиговых напряжений вдоль некоторой площадки. Это и явилось основой представлений о механизме очагов землетрясений.

Но квадрантное распределение волн, как было показано в подразделе 4.3, наблюдается и при таком сдвиге, в ходе которого не освобождаются, а создаются напряжения, причем последние могут быть как упругыми, так и пластическими.

Для произвольно ориентированной площадки сдвига картина распределения воли показана на рис. 97. Она характеризуется таким же квадрантным распределением воли, как и в модели упрутой отдачи, только при заданном направлении движения вещества вдоль плоскости сдвига знаки воли получаются противоположными [7, 46]. На основании проведенных экспериментов можно заключить, что для обеспечения квадрантного распределения воли вокруг очага не обязательно исходить из механизма упругой отдачи. Алалогичная картина воли может быть возбуждена и при создании напряжений в процессе некоторого сдвига, который как раз возможен в очаге в результате совершения работы внешными силами. Чтобы лучше представить такую возможность, рассмотрим конкретную модель деформирования вещества в твердой оболочке Земли.

Известно [30], что внутреннее вещество Земли разогревается за 192



Рис. 98. Схема распределения сил (а) и схема относительного смещения вещества вблизи площадки разрушения (б): 1-внутреннее давление; 2-гидростатическое давление вышележащих слоев; 3-равнодействующая упругих сил в олое; 4-внутреннее давление p_1 ; 5 - гидростатическое давление $p_2 < p_1$; 6 - илощадка разрушения; 7направление относительного смещения вещества

счет радиоактивного тепла и, следовательно, должно расширяться. Это расширение сдерживается твердой оболочкой, в которой под действием внутреннего давления возникают растягивающие напряжения (рис. 98, а). При определенном внутреннем давлении напряжения оболочке в некоторых местах могут достигнуть предела разрушения. Однако последующее движение вещества вблизи очагов разрушения будет определяться уже не топько релаксацией упругих напряжений. До момента разрушения равновесие поддерживалось благодаря равенству внешних сил и упругих напряжений в веществе оболочки. Разрушение ведет к снятию упругих напряжений и нарушению равновесия (рис. 98, б). Под действием внешных сил начинается движение вещества, в ходе которого совершается работа. Чтобы остановить это движение и вновь восстановить равновесие, необходимо диссипировать или излучить энергию и уравновесить внешние силы; т.е. в некоторых других объемах вещества оболочки должны возникнуть напряжения.

Таким образом, при разрушении оболочки должны протекать два процесса. С одной стороны, в разрушенных объемах вещества, где напряжения превысили прочность материала, происходит частичная репаксация упругой части напряжений. С другой стороны, в результате перемещения разрушенного вещества внешними силами вблизи очага разрушения возникают напряжения, которые в конечном счете уравновешивают действие втих сил. При этом кинетическая энергия переходит в тепловую, а некоторая ее часть излучается в виде энергии воли.

На основании изложенного очаг землетрясения может быть представлен в виде двойного источника. Силовая модель, эквивалентная такому двойному источнику, показана на рис. 99. На тепо массой M действует сила F, которая уравновешнывается силой сопротивления F_1 упругой пружины. Появление площадки разрыва в очаге землетрясения на эквивалентной схеме означает обрыв пружины и появление сил сопротивления F_2 . В качестве таких сил могут быть объемные

сил сопротивления г2. В качестве таких они ногу сыла соссимые или сдвиговые напряжения, возникающие при взаимодействии тела мас-



Рис. 99. Эквивалентная силовая модель очага землетрясений, представияемого в виде двойного источника сой M с окружающей средой в процессе его движения, На рис. 99 эти силы специально отнесены к контакту между тепом массой M и подставкой, чтобы подчеркнуть их приуроченность к периферии того объема вещества, который первоначально начал двигаться в очаге. С момента обрыва пружины

начинается параллельное развитие двух процессов. Во-первых, растянутая пружина стремится возвратиться в исходное состояние, и при этом выделяется (освобождается) энергия ее упругих деформаций, Эта энергия эквивалентна упругой энергии массива, которая излучается в виде волн после появления площадки разрыва. Во-вторых, тепо массой М начинает смещаться под действием силы F. При этом смещении совершается работа против сип сопротивления, которые не остаются постоянными. В первый момент движения они, по-видимому, минимальны. Однако в дальнейшем эти силы должны увеличиваться, В результате нарастания сил F, а также возможного уменьшения сил F смещение тела M будет конечным. Максимальное ускорение его должно быть в самом начале движения и будет определяться уравнением a = F/M. В конце движения оно станет равным нулю. Поэтому время смещения и и смещение и в первом приближении будет связывать соотношение $w = \frac{at^2}{2}$, а совершения при втом смещении 2 работа А может быть определена из равенства

 $A = A_1 + A_2$,

где A_1 – работа по преодолению сил сопротивления; A_2 – работа против силы тяжести, равная $\Sigma M g h$; h – вертикальная составляюшая смещения.

В процессе совершения работы по преодолению сил сопротивления в очаге среда вокруг движущейся массы подвергается деформированию, которое может быть не только упругим, но и необратимым. Возникающие при этом напряжения возбуждают в окружающем массиве соответствующие волны. Этот процесс и составляет второй источник излучения волн в очаге землетрясения, который дополняет первый источных - излучение волн за счет релаксации упругих напряжений.

Очевидными являются соотношения знаков напряжений и периодов воли, излучаемых за счет первого и второго источников. При излучении первого и второго источников знаки воли в одних и тех же квадрантах вокруг очага будут противоположными. Это наглядно иллюстрируют сейсмограммы (см. рис. 96), на которых, в частности, видна и двойственность очага излучения. Первое вступление и последующие высокочастотные колебания относятся, очевидно, к волнам, излученным за счет снятия упругих напряжений в очаге. Противопопожное по знаку и более низкочастотное по спектору второе вступление может быть отнесено к волнам, возбуждаемым вторьом источилком. Приведенные выше формулы позволяют произвести некоторые оценки эффективности второго источника. Масса определяется протяженностью очагов землетрясений в направлении сдвига, которан составляет 10 - 100 км [73]. Сила F_1 соответствует прочности горных пород и по порядку величины равна 10^7 Па. Подстановка этих значений в формулу для ускорения при плотности, равной 3 г/см³, дает величину ускорения 3 - 30 см/с².

Время смещения можно оценить на основании периодов инэкочастотных воли, которые наблюдаются в непосредственной близости от очагов и с наибольшей вероятностью излучаются за счет второго источника (рис. 96). Это время равно половине периода и составляет 3-5 с. Отсюда получаем порядок величины смещения (w = 0,1 + + 3,0 м), который согласуется с реальными подвижками в очагах.

Чтобы оценить работу, совершаемую против сил сопротивления, представим процесс в очаге в виде сдвига вдоль некоторой площадки по готовому разлому. Тогда основной силой сопротивления будет ситрения. Для оценки работы против такой силы необходимо знать пв ковфициент трения горных пород и площадь очага, которая колеблется в широких пределах. Для конкретности рассмотрим ташкентское землетрясение, для которого площадь основного разрыва равна 50 км2, размеры очага в вертикальном направлении (в направлении сдвига) около 10 км [73]. При глубине центра очага примерно 8-10 км гидростатическое давление составляет более 2 · 108 Па, поэтому сипу трения можно принять равной 108 Па. Используя приведенные эначения, попучим А1 = 1015,7Дж. Такого же порядка работа А2, которая совершена при подъеме вещества в очаге (объем 1017 см3) на высоту З м. Фактическая сейсмическая энергия ташкентского земпетрясения на два порядка меньше полученной величныы. Это эначит, что даже одного процента той энергии, которая затрачена на совершение работы (деформирование вещества) вдоль площадки сдвига, достаточно, чтобы обеспечить наблюдаемый запас энергии сейсмических волн.

Общая годовая энергия сейсмических воли на Земле составляет 1018 _ 1019 Дж [12, 70]. Следовательно, для обеспечения этого количества энергии в очагах землетрясений должно затрачиваться 10²⁰ _ 10²¹Дж. Согласно предлагаемой модели, для совершения в очагах работы используется энергия расширяющегося при разогревании вещества. За счет радиоактивного распада элементов в Земле ежегодно выделяется порядка 10²¹Дж [30]. Сравнение показывает вполне удовлетворительное согласие порядков величин, что подтверждает возможность установления энергетического баланса в рамках обсуждаемой модели очагов и в целом для Земли.

Для доказательства реальности выдвигаемой модели очагов землетрясений в виде двойного источника и определяющего значения второго из них можно привести и другие данные. Так, в работе [46] по распределению знаков первых вступлений объемных волн в рамках упругой модели очага (первый источник) определены направления

25-2

2436



Рес. 100. Схема опъта, в котором можно смолелерсеать дво2всй врошесс излучения воли в смага землетрясения DOLENES BELIETEA BADTE DIOCEDE-TI CICTARERA, HIOSH CACTERINA STO RE LACTORIESE BOTH ES DC. ECHE ETODOTO ECTOMEZZA, ONDERErestate a patore [46] Hantan DEEZE ECCEZNEK, KAK FORODETOCH ESCIE. EATO NEMERTS HA OUDATENE. CRASSTOCE, TTO HOCTE TAKOTO HT_ MERCEZZ ATA HOJARTEKOHEPO боль CARCTER OHATOB SEMITETDECEHER POшество, расположенное ниже плос-KOCTH CHERTS, CMEMBETCH EBEPK вдоль илоскости разрыва. Это напревление смещения, определенное

2436

по знакам вступления объемных сейсинческих воли, совладает с направлением, которое вытекает из рассмотренной выше силовой модели второго источника очага (рис. 92, 6).

В рамках предлагаемой моделя очага могут быть объяснены и другие геофизические явления, некоторые из которых будут рассмотрены икже. Ока позволяет также поставить в лабораторных условнях широкое экспериментальное исследствиие процессов в очагах землетрязений. В качестве примера рассмотрим один вариант такой постаисии.

Схема предполагаемых опытов приведена на рис. 100. Два стержия, заделанных одним концом в массиве, растягиваются одновременно силой F. При этом в них возникают растигивающие напряжения аз и од, которые уравновешивают силу. При некоторой величине сипы веформодии стержней достигнут такой величины со (напряжения соответственно 01.0 н 02.0), при которой произойдет разрушение одного из них. Пусть это будет стержень 1. После разрушения напряжения в нем обратятся в нупь, а упругая часть деформации породит упругие волны: вблизи площадки разрушения возникнут волны сжатия, которые побегут к концам стержня. Чтобы уравновесить силу F поспе разрушения стержия 1, напряжение в стержне 2 должно возрасти на воличниу 01.0 и достигнуть значения 01.0 + 02.0. Другими сповоми, стержень 2 после разрушения стержня 1 дополнительно подвергается динамической нагрузке растятивающей силой, в результате чего в нем возбудится волна растягивающих напряжений. В зависимости от его физико-механических характеристик эта волна может ности не только упругие, по и пластические деформации. Волны, возикшие в стержие 1, представляют первый источник излучения, в стержие 2 - второй источник. Первый всточник излучает только упругие волны, в то время как второй источник может генерировать и упруго-пластические вопцы. Знаки воли, излучаемых первым и вторым источилками, противоположны. В массиве, с которым скреплены оба стержия, естественно, будет наблюдаться сложение волн от первого и второго источинков.

Разрушение породы в очагах, очевидно, не является мгновенным процессом. При разрушении на некотором начальном участке в приле-196 гающих областях возникают дополнительные нагрузки, которые могут приводить не только к дальнейшему деформированию, но и полному разрушению в них материала. На приведенной модели со стержнями этот процесс легко воспроизвести, если представить большой набор стержней. При разрушении стеркия 1 (или первой группы стержней) во всех остальных возникают дополнительные нагрузки, которые могут вызвать разрушение новых стержней. Этот процесс может повторяться многократно. При этом в массив, с которым скреплены все стержней (первый источник) и упругая энергия разрушившихся стержней (первый источник) и упруго-пластические волны при дополнительном деформировании целых стержней (второй источник). Сейсмический сигнал от такого двойного источника будет складываться из последовательности упругих колебаний, которые наложатся на более низкочастотные колебания. Реальные сейсмограммы обнаруживают согласие с описанной моделью очага землетраения.

Корреляция высокочастотной составляющей колебания с первым ноточником, а низкочастотных колебаний со вторым источником может быть подтверждена также спедующим соображением. Если все стержни приведенной выше молели изготовлены из примерно опинакового материала, что как раз ближе всего соответствует реальному очагу, то критические условия разрушения в них будут достигаться приблизительно одновременно. Это значит, что в момент разрушения первой группы стержней в остальных стержнях напряжения также должны быть близки к разрушающим значениям. Поэтому даже незначительное возрастание напряжений способно привести к их разрушению. Сохранение этих стержней и установление нового равновесия вблизи очага разрушения среды возможно только в том случае, если число стержней, на которое распределяется дополнительная нагрузка, намного превосходит число первоначально разрушившихся стержней. Применительно к реальному очагу землетрясений это означает, что объем, в котором происходит разрушение среды и освобождаются упругие напряжения, должен быть намного меньше объема, в котором возникают новые напряжения, уравновешивающие действие внешнюх сил. Поскольку длина излучаемых воли овизана с размерами источников излучения, то нетрудно сделать вывод о соотношении преобладающих частот: колебания от первого источника должны быть более высокочастотными, чем от второго источника.

Приведенный пример моделирования соответствует таким очагам, в которых разрушение среды происходит под действием раститивающих усилий. Аналогичная вкспериментальная модель может быть петко создана и для случая одвигового разрушения в очаге землетрясения. Значение схем деформирования, аналогичных схеме на рис. 100, состоит еще и в том, что с их помощью можно в наиболее наглядной форме воспроизвести отдельные стадии излучения воды. Действительно, если бы в момент разрушения стержня 1 правые концы обоих стержней, к которым приложена сила, были фиксированыг, т.е. в стержнях была задана определенная деформация, то излучение воли определялось бы только релаксацией упругих напряжений в разрушенном первом стержне. Этот случай означает, что работа силы F после раз-

THERE ARE TTEL OF CONSECTION WIET TOTAL STIRE HEL PO & MARY. (SUBAR 13 SK., L'J. SECOL, TO IN LEWIS LEWIS TO and come I preserve to be programmed a the manufacture NA MARANA MARCE CREATED BREAKING. TOTAL IN. LITTE STA MANANZA, MALADAN DICTURATION PACIFICS STUCK COMPA IN I WANNANT, TO THE I, BUTTLE SCHEEPETTE SECTION THE MANNARA LEGANARIA & CALL, LOUAL CARENES RECTATED TO UM SOUTH CAR, THAT'S SETSIST CHARE. COBLERS THE STAL FROM WIN INT IS BOT WILLIAR SECOND, SET & CARLES CARTERIN HAT LE GAMMEL DE DEUTSTAL OF VALLE PARTIE I & BUE HEL TH WATMAN SAND, FORMER, ANTEND SOLE OF DECEMBERS THE LANGUARDEN CONTRA 2 & CONSISTER SELECT ENCONY ENTERING MARTI INCONTRACTAL ETS ETSECTEDICES OF ACTIVE SECTION INT CAL & DATIS L'ACCHARTS, TO THE OTHER THINK THE THE WYARDS VALUES BAUT DESCRIPTIONS CONTENTS CATHOR PROVIDE ETVINEN WAYDERLS WIRET GATE OTHER TITLEDL

4A.2. TRANSME WITH BUREA LETTER IN SACET SCHOOL

HAVE AND A RECTURIENT ELEMENT STREETETETET METETET 16 MONTON MYTH WALLAUST. TO B VIEW ITTE GALAFECTER E-WARE UNITS WATE WARE BALERITS EC ARE CONTRIBUTED TO THE RE-THAN THE ME MERICA UTTRESSARS MERLY COLOR VER ESTEDIENCE, THE K KATAWARMATLA. HATZANA GETA BOTE OTELA-TARDOTH CEZISTETECTEVET · EMACTIMUM/TH NOTONIZES BOTTIGEES, CITE ES EDITORIA ESTIGETOS BULLADAUCTIATING, GUATLA - BUSKUTACTUTELAL 3TO ESTETAS ITTIES CO-WANTL, WOR OUST SENCETURCERER REPERCISED TOTER MORETAD JEFT-ГСА СЛАНТИ МИЛОГКИ. ПОПИТИИ ПОСАСТАВЛЕНИИ СНАГОВ В ЕКСЕ ДВСЕСго илионка на сониже этой молели предновнаты, надремер, в рабо-74 1641.

Пралиманная выше модель счага дает простой и физически понятныя инханизм арейного источныха. На основе этой моделя важе булут россмотроны некоторые характерные черты реальных волновых полья, наблудаемых при землетрясениях.

Интерасно прежда всего обратить внимание на распределение или имания им сцвиговом нагружения. Как видно из рис. 101, растягнияхания напряжения возникают в кведрантах П н IV. За счет BTHX. нацимения в вешестве могут быть достигнуты критические Наприкония на разрыв вещества, и в нем сбразуются трешины, перпошликулярным к плоскости сденга. Очевидно, такие трешины могут имонться в сопостях II и IV только в пределах площадки сденга, поскольку породать растягливающие напряжения, превосходящие предел прочинсти вещества на разрыв, невозможно. Отсюда, кстати, вытекнот, что интонсивности воли сжатия и разрежения, возникающих в пролоссо попрыконного сдвига, могут быть различными.

В работо [1] праведены некоторые сочетания трещин, которые набикликится иблиси разломов в реальных массивах пород. Качественно

они легко объясняются приведенным выше распределением напряжений при сдвиге, что дает новый способ излучения характера тектонических движений по распределению трещин. Кроме того, анализ структуры трещин поэволяет детализировать процессы протекания напряженных сдвигов. В частности, из анализа характера трещин видно, что в целом очаг может представлять не только сдвиг вдоль одной площадки, но и серию близких по времени сдвигов вдоль отдельных плошадок, расположенных примерно в одной поскости. Очевидно, вначале происходит сдвиг вдоль одной площадки, который затем павиной распространяется на другие. При этом важно обратить внимание на спедующее обстоятельство. В результате сдвига на некоторой первоначальной площалке вдоль плоскости спвига начинают распространяться две волны; с одной стороны от плоскости - волна сжатия, а с другой стороны - волна разрежения, Попучаются своеобразные



Рис. 101. Качественная картина распределения напряжений вблизи плошадки, возникающих при напряженном сдвиге: 1-илощадка сдвига; 2-направление смещения бортов вдоль илощадки сдвига; 3распределение сжимающих (+) и растягивающих (-) напряжений вблизи плоскости сдвига; *I_IV* - квадранты

"ножницы", которые при своем распространении вдоль плоскости разлома как бы расширяют дальше первоначальную зону сдвига.

Экспериментальные данные по землетрясениям подтверждают те качественные закономерности, которые сформулированы выше на основе новой модели очага. В качестве примера на рис. 102 и 103 приведены сейсмограммы землетрясений и некоторые экспериментальные зависимости, взятые из работы [64]. В соответствии с принятой выше схемой развития процессов в очаге индексами p_L и s_L обозначены волны, которые могли возбудиться под действием напряжений, возникающих при сдвиге, а p и s – это волны за счет освобождения упругих напряжений в очаге.

Приведенные на рис, 103 данные относятся к землетрясениям разных классов, при которых гнубины очагов изменялись незначительно и составляли 10-12 км. Энергия этих землетрясений различка, причем с уменьшением их интенсивности разница между амплитудами высококачественной и низкочастотной составляющих уменьшается. Слабые землетрясения являются, очевидно, следствием разрушения в пределах главным образом тех областей, где первоначально были достигнуты критические условия. Сильные землетрясения, по-видимому, связаны с такими очагами, в которых оказывается возможным распространение разрушения и за пределы первоначальной области его. При этом запасы энергии упругой отдачи определяются в основном размерами первоначальной зоны разрушения, в то время как энергия волн, излучаемых на второй стадии, зависит от общих размеров очага. Вот почему с уменьшением силы землетрясения, как видно из рис. 103, отношение амплитуд волн р/рг, возрастает. 199



Рис. 102. Сейсмограммы землетрясений [64]

На рис. 104 приведены зависимости амплитуд в продольной и поперечной волнах от расстояния в эпидентральной зоне землетрясений [31]. Из них видно, что по каждой волне зависимость распадается на две чести. Такая структура графиков может быть объяснена в рамках предложенной выше модели очага землетрясения, когда растя-



Рис. 103. Зависимости смещений в продольных и поперечных волнах при землетрясениях 7 - 13 классов от расстояний 200





жение твердой оболочки происходит при наличии готового разлома. В усповиях, когда причиной деформации твердой оболочки является препоженное изнутри давление, нижний борт по отношению к верхнему должен всегда смещаться вверх (рис. 105). Максимальные напряжения при этом будут вдопь нижнего (на рис. 105 правого) борта разпома, поскольку к верхнему (левому) борту эти напряжения передаются через зону нарушенных пород, расположенных между бортами. Вспедствие этого наиболее вероятной плоскостью сдвига внутов разпома является его нижний борт, независимо от сриентации самого разлома. Отсюда спедует, что и волны максимальной интенсивности возбудятся в неразрушенном массиве, прилегающем к разлому снизу. В другую часть массива, расположенную сверху (слева) от разпома, будет передано меньше энергия, поскопьку некоторая ее часть диссипируется при переходе через зону разлома. Из рис. 105 видно, что в эппцентральной зоне при таком очаге всегда будут наблюдаться волны пониженной интенсивности, прошедшие через разлом. Причем важно подчеркнуть, что уменьшенные амплитуды должны наблюдаться как вправо от эпщентра до расстояния Ro, так и влево при распространении на сколь угодно большие расстояния. Справа от разпома на расстоянии R0 амплитуды волн должны скачком возрастать. Величина этого скачка определяется теми потерями энергии, которые произошли при переходе воли через зону разпома. Поскольку свойства пород справа и слева от разпома, по всей вероятности, примерно одинаковы, то и затухание волн в них не должно отличатьсуществу следует из рис. 104: наклоны как верхней ся. Это по кривой, так и нижней ветви для каждой волны практически одинаковы.

Верхняя кривая, как видно из рис. 104, начинается с расстояния, примерно равного 200 км. Это расстояние, очевидно, соответствует величине R₀. Нижняя ветвь оканчивается на расстоянии около 350 км. Как можно заключить из работы [31], это окончание ниж-

26-1

2436



Рис. 105. Схема глубинного разпома и общей картины возбуждения волн ней ветви обусловлено системой расположения станций: основная сеть станций расположена на территории СССР, в то время как очаговый район находится в пограничной области, простираясь с юга-запада на северо-восток. По-видимому, глубинный разлом, с которым связаны памиро-гиндукушские землетрясения, имеет падение примерно с северозапада на юго-восток, уходя под хребет Гиндукуш. В точках, расположенных за пределами СССР на юг и юго-восток от очаговой

зоны, согласно развитым выше представлениям, пониженные значения амплитуд должны наблодаться на сколь угодно больших расстояниях. Поэтому окончание нижней ветви на рис. 104 на расстоянии около 350 км скорее всего объясняется отсутствием соответствующих точек наблюдений на больших расстояниях. Очевидно, ее можно продолжить и на более далекие расстояния.

Значительный интерес представляет общая картива распределения очагов землетрясений на Земле, Согласно работе [46], все оча-ГИ Землетрясений можно разленить на две основные группы в зависимости от напряженного состояния в них. В одной из этих групп преобладает растяжение, в другой - сжатие. Это распределение напряжений построено на представлении о том, что главным источником энергии сейсмических воли является энергия упругих напряжений, освобожавемая в очагах при появлении плошадок разрушения, т.е. принимается механизм упругой отдачи. Здесь рассматривается другая модель очага. согласно которой процесс излучения волн в очагах происходит в две стадии. При этом общее напряженное состояние Земли принимается таким, что в основной части твердой оболочки в настоящее время повсеместно преобладают растягивающие напряжения. На первый взгляд кажется, что это представление противоречит фактическим данным, приведенным в работе [4]. Однако это противоречие легко устраняется, если принять во внимание, что волны излучаются не только за счет освобождающихся напряжений (первый источник), но и в резуньтате создания новых счагов напряжений (второй источник). И там, где интенсивность первого источника достаточно высока, первые вступления на сейсмограммах связаны с приходом воля релаксирующих напряжений. Наиболее вероятно, что такие очаги связаны с появлением новых разрывов в оболочке. И не случайно, очевидно, они располагаются вблизи поверхности Земли и приурочены в основном к зонам океанических хребтов, где наиболее вероятно формирование новых разломов.

Зоны сжатия, согласно работе [46], приурочены к районам Земли, где имеют место глубинные разломы. Роль первого источника в таких очагех, по-видимому, второстепения, особенно на больших глуби-

202

нах, где прочность вещества. оболочки намного меньше гидростатического давления. Основным источником излучения воли при расширении внутреннего вещества по готовому разлому являются те напряжения, которые возникают во время сдвига за счет сил трения (второй источник). При таком сдвиге имеет место квадрантное распределение воли; но знаки их в одних и тех же квадрантное распредетивоположными по сравнению с волнами, излучаемыми по механизму упругой отдачи. При сдвиге нюжний борт разлома всегда будет смещаться вверх по отношению к верхнему борту. Поэтому в епидентральной зоне в качестве первого вступления в подавляющем большинстве случаев должны наблюдаться волны скатия (см. рис. 105), что как раз следует из работы [46].

Из предлагаемого механизма объяснения процессов в очагах, приуроченных к глубинным разпомам, вытекает, что активизация подвюжек вдоль данного разлома на некоторой глубине неизбежно должна приводить к их активизации и на других глубинах. Прилегание бортов друг к другу, очевидно, неодинаково по глубине разпома. В зонах наиболее плотного соприкосновения бортов происходит их зацелление в процессе сдвига, и в них прежде всего вероятно разрушение вещества твердой оболочки при повышении внутреннего давления. Разрушение в одной зоне ведет к повышению напряжений в других зонах, и там возрастает вероятность возникновения очага землетрясения. Поэтому сейсмическая активность должна коррепировать на различных глубинах как по простиранию разпомов (в пространстве), так и во времени. Наличие зональности распределения очагов по глубине, отмечаемое в работе [24], по-видимому, также объясняется описанным механизмом: очаги землетрясения приурочены к зонам наиболее плотного прилегания неразрушенных бортов разломов, в то время как интервалы глубин с минимальным выделением сейсмической энергии должны соответствовать участкам разпомов с наименьшими направлениями сдвига.

4.4.3. Оденка некоторых геофизических явлений

Качественная модель очагов землетрясений, рассмотренная выше, позволяет оценить некоторые явления и процессы в развитии Земли. Начнем с вопроса о балансе энергии.

Энергия сейсмических воли в год составляет $10^{18} - 10^{19}$ Дж [12, 70]. Источником этой энергии, согласно новой модели, является энергия радиоактивного распада элементов внутри Земли. Тепловая энергия превращается в энергию сейсмических воли с помощью механизма расширения вещества Земли в процессе его разогревания. Естественно, что к.п.д. этого превращения далек от единицы. При расширении вещества вдоль разломов происходит, очевидно, интенсивная диссипация энергии за счет необратимых деформаций вблизи плоскостей сдвига. Можно предположить, что в качестве оценки к.п.д. при сдвиге может быть использована аналогичная величина при крупных взрывах, которая составляет примерно 1%. При-

26 - 2

нимая эту величину как допушение, получим, что для обеспечения наблюдаемого уровня сейсмической энергии необходимо выделение енергии примерно $10^{20} - 10^{21}$ Дж/год. Помимо сейсмической энергии, енутренняя энергия Земли расходуется на покрытие теплового потока с ее поверхности, который равен $10^{11} + 10^{12}$ Дж/с [30], что соответствует энергии $10^{20} - 10^{21}$ Дж/год.

Таким образом, суммарная элергия, которая должна выделяться при радиоактивном распаде элементов, составляет около 1021Дж/год. При массе Земли 5,97 . 1027 г [12] удельное выделение внергии будет равно 1,67 · 10-7Дж/г в год. Это значение по порядку величины хорошо согласуется с удельным содержанием радиоактивных элементов в образцах пород Земли. Выделение теплоты за счет энергии радноактивного распада для ультраосновных пород в дунитов равно (1,5 - 1,6) 10-7 Дж/г в год. Существующие оценки тепловыделения в Земле колеблются примерно от деоятых долей до десятков Дж/г год [12, 30]. Оценка тепловыделения по содержанию радноактивных элементов в упьтраосновных породах, по всей вероятности, нанболее оправдана, поскольку эти породы ближе всего характеризуют состав основной массы оболочки Земли. Не случайно, очевилно, что с ней близко совладает оценка тепловыделения в Земле по содержанию радиоактивных элементов в каменных метеоритах, дающая согласно [12, 30] (4-12) 10-7 и 1,58 · 10-7 Дж/г в год. Для дальнейших оценох примем величину 1.7 · 10-7 Дж/г в год. Исходя из этой величины произведем оценку степени возможного разогревания Земли в течение ее истории.

Возраст Земли примем равным 4 мпрд. лет. В течение этого времени количество радиоактивных элементов непрерывно уменьшалось. Так, согласно работе [12] количество выделяемой теплоты за 4 млрд. лет уменьшилось в 4 раза. Если, однако, учесть точность определения этой величины, то это изменение можно считать незначительным и не учитывать его при оценке степени разогревания Земли.

Выделение энергии в количестве 1.7 · 10-7 Дж/г в год означает. что за 4 мпрд, пет в каждом грамме вещества выделилось 6,8.102Дж энергии, Полученная величина удовлетворительно согласуется с данными работы [30], а которой определение количества теплоты произведено при различных предположениях о распределении радиоактивных элементов в Земле. При теплоемкости 0.08 Дж/г. С указанное количество экергии соответствует повышению температуры вещества на 800°. Если далее принять, что коеффициент объемного расширения вещества Земли при разогревании имеет порядок 10-51/°C [30], то нагревание на 800° соответствует увеличению объема примерно на 1%. При объеме Земли 1027 см3 это увеличение составляет 1025 см3. С полученной величиной хорошо согласуется объем земной коры, т.е. вещества, расположенного выше границы Мохоровичича. Если принять среднюю толщину коры на Земле равной 20 км, то ее объем как раз оказывается равным 1025 см3. Отсюда следует, что образование коры в основном можно объяснить выделением радиоактивного тепла в Земле в вытеснением разогретого вещества за пределы ее первоначальной поверхности.

Интересна оценка внергии, которая необходима для поднятия вещества коры над первошачальной поверхностью в поле силы тяжести. При средней толщине коры 20 км центр тяжести поднимаемого вещества располагается на высоте 10 км. Чтобы поднять на такую высоту 1 г вещества, необходима внергия около 100 Дж. Такого же порядка и удельная энергия, которая выделилась во всем объеме вещества Земли. Однако поскольку масса коры составляет 1% сбщей массы Земли, то это означает, что на подъем вещества коры в поле силы тяжести затрачено около 1 % всей тепловой энергин, выделившейся в Земле.

Оценка затрат энергии на подъем вещества коры в поле силы тяжести производилась в предположении, что твердая оболочка бесконечно тонка, т.е. высота подъема принималась равной половине толшины земной коры (10 км). В действительности вещество коры выжимается с глубин, расположенных ноже твердой оболочки. Если учесть, что эта толщина в настоящее время составляет около 700 км (судя по расположению фокусов землетрясений), то тогда фактическая высота подъема почти на два порядка больше принятой выше величины. Это значит, что основная доля тепловой енергии, которая выделилась внутри Земли за всю ее историю, с учетом тепловых потерь с поверхности, могла быть израсходована на формирование земной коры, т.е. на выжимание внутреннего вещества на поверхность через твердую оболочку.

Первоначальная поверхность Земли, по всей вероятности, была представлена границей Махоровкунча. Все вещество, которое сейчас расположено выше этой границы, было вытеснево по разломам в твердой оболочке. В рамках втих представлений океаническую кору можно связать с периодом развития Земли, когда твердая оболочка на ней была тонка. Поэтому ее разрушение происходило относительно легко и разломы густо покрывали поверхность Земли. Образование континентальной коры спедует отнести к более позднему периоду. когда толщина оболочки увеличилась. Чем толще оболочка, тем больше период накопления внутренной внергии, необходимой для разрыва оболочки, и, следовательно, тем больше масштабы разломов и интенсивнее вытеснение по ним вещества, Отсюда вытекает, что замкнутую картину развития Земли можно построить, если предположить во времени постепенное увеличение толщины твердой оболочки. Дополнительным доказательством этой тенденции в развитии твердой обопочки Земли является увеличение со временем размеров складчатых областей [4]. Наиболее молодая зона альпийской складчатости заметно превосходит зоны, образовавшиеся в более равние перводы истории Земли, Океанические хребты, согласно указанной тенденции, спедует считать наиболее молодым образованием.

В режиме выделения сейсмической энергии в целом по Земле можно проследить периоды высокой активности, которые регулярно сменяются периодами низкой активности. Отсюда сделан естественный вывод, что отдельные землетрясения не являются независимыми событиями. В рамках упругой модели очагов, как указывается в работе [12], трудно найти единый механизм, обеспечивающий такое вы-

деление внергии. Если же исходить из новой модели очагов, то дикличность сейсмической активности может быть объяснена процессом выделения радноактивного тепла, из которого вытекают закономерности деформирования вещества твердой оболочки. Периоды затишья сей-СМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СВЯЗАНЫ, ОЧЕВИДНО, С НАКОПЛЕНИЕМ ТЕПЛОВОЙ ВНЕСгии и повьплением напряжений внутри твердой обрлочки. Усиление сейсмической активности происходит в периоды разрушения твердой оболочки и расширения вещества по разломам из внутренных областей в наружные. Из работы [12] следует, что период времени от одного максимума активности до другого не очень постоянен и составляет от 2 до 10 пет. При скорости выделения тепловой внергия 1,7.10-7 Джиг в год приращение энергии, например, за 10 лет составит 17.10-7 Дж/г, т.е. в одном грамме вещества выделится примерно 1.6 • 10-7 Дж. За счет такого количества тепловой энергии увеличение температуры будет очень незначительным (около 10-6°). Объем Земли при таком повышении температуры увеличится на 10¹⁶см³. Если считать, что это увеличение произойдет путем равномерного увепичения радиуса Земли по всем направлениям, то приращение радиуса составит примерно 10-3 см, т.е. деформания будут ничтожно малы (10**). Однако равномерного деформирования оболочки, очевидно, не происходит. На это указывает, в частности, отсутствие очагов землетрясений на общирных площадях и сосредоточение их вдоль сравнительно узких участков поверхности Земли. Это означает, что деформация твердой оболочки происходит в основном лишь в отдельных ее местах, составляющих малую часть всей поверхности. Эта часть и представляет зоны сейсмической активности. Причем даже в пределех етих зон, очевидно, деформеции неоднородны. Критические условия разрушения оболочки достигаются лишь в отдельных местах. где и возникают очаги землетрясения,

Для оценки этих условий можно применить следующий прием. Пусть в течение некоторого времени давление внутри оболочки нарастало без ее разрушения. Когда деформации оболочки достигнут критической величины, начнется ее разрушение, в результате чего произойдет серия землетрясений. Суммарная площадь разрывов при этих землетрясениях составит то эффективное сечение в оболочке, в пределах которого были достигнуты разрушающие напряжения. Можно все площадки разрывов в оболочке свести в одну плоскость, а растягивающие напряжения в этом эффективном сечении создавать той интегральной силой, которая получается за счет внутреннего давления на половинки сфер. Эта сила равна произведению

$$F = PS$$
,

где *Р*- давление на внутреннюю сферическую поверхность оболочки; 5 - площадь диаметрального сечения земного шара.

Если обозначить через s суммарную площаль очагов землетрясений, происшедших за данный отрезок времени, то разрушающее напряжение

$$\sigma = P - \frac{S}{2},$$

Для деформалий, очевидно, справедливо анапогнчное соотношение

$$E = \varepsilon \frac{S}{s}$$
,

где є - равномерная деформация всей оболочки; Е - деформация в сечениях, по которым произошло разрушение оболочки.

Давление Р зависит от периода накопления внутренней энергии радиоактивного тепла. Чем больше этот период, тем больше энергия и, следовательно, тем больше Р. Соответственно изменится и количество сейсмической энергии: чем больше период и давление Р, тем больше сейсмическая энергия.

Допустим, что после периода сейсмической активности избыточные растягивающие напряжения в оболочке полностью свялись и начнут заково накапливаться за счет дальнейшего разогревания вкутреннего вешества. Тогда за 10 лет, как было оценено выше, деформация всей оболочки составит 10⁻¹¹. Представим теперь, что вся эта деформаиия сосредоточится в очаге одного землетрясения. Размеры очагов землетрясений колеблются в широких пределах. Возьмем для конкретности ташкентское землетрясение, для которого плодадь с площадки .сдвига оценена в 50 км² [73]. Если теперь подставить это значеные площади в в формулу для деформации, то при с = 10-11 деформация Е вещества в очаге будет порядка 10⁻⁵. Эта величина также "далека от разрушающих значений, хотя весь запас накопленной за 10 лет энергии израсходован на подготовку сравнительно небольшого землетрясения, а за 10-летний отрезок времени на земном шаре происходит много землетрясений.

Произведенные оценки показывают, что после периода сейсмической активности растигивающие напряжения в оболочке не снимаются полностью. Малые значения дополнительных деформаций, которые приводят к появлению в ней разрывов, свидетельствуют о том, что твердая оболочка все время находится в напряженном состоянии, близком к разрушению. Энергия радиоактивного тепла идет только на создание в оболочке дополнительного сравнительно небольшого напряжения, которое накладывается на уже существующее в ней поле напряжений, созданное в прошлом. С этим напряженным состоянием вещества твердой оболочки и связано, очевидно, то, что период сейомической активности неустойчив. Вещество в сболочке находится в близкритическом состоянии, поэтому деже незначительные неоднородности в оболочке могут существенно изменить момент наступления следующего цикла активности. Но несомненным остается то, что чем больше период затишья, тем интенсивней будет за ним сейсмическая деятель-НОСТЬ.

Полученные выводы, возможно, имеют значение для проблемы прогнозирования землетрясений. Из них, в частности, следует принцепиальная возможность защиты от землетрясений населения крупных городов, расположенных в сейсмически опасных зонах. С помощью искусственных сравнительно небольших по амплитуде дополнительных полей напряжений, которые в настоящее время можно создать взры-

вами крупных зарядов, близкритическое состояние вещества твердой оболочки может быть доведено до критического состояния в заданный момент времени. Этим, естественко, само землетрясение не предотвратить, но его основной катастрофический фактор - внезапность может быть устранен.

Рассмотрим вопрос о режиме выделения сейсмической энергии во времени. В работе [12] приводятся результаты изучения этого режима, из которых следует, что в наотоящее время установлено два типа зависимостей, характеризующих последовательность выделения сейсмической энергии во времени

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{y} + \beta \log t \tag{81}$$

Ħ

$$e_2 = \theta - B e^{-K\sqrt{t}}, \tag{82}$$

где є – освобожденная деформация, которая пропорциональна корню квадратному из сейсмической энергии; у β , θ , B, K – постоянные процесса.

Исходя из новой модели очага землетрясения, можно сказать, что режим выделения сейсмической энергии во времени определяется генерацией радиоактивного тепла. Изменение числа радиоактивных агомов во времени описывается, как известно, уравнением

$$N = N_0 e^{-\mu t}$$
, (83)

где N₀ - число атомов радиоактивных элементов в начальный момент времени: N - число атомов через время *t*; µ - постоянная распада.

Спедовательно, за время (распадается N₀-N атомов, а выделившаяся при этом энергия

$$E = K_1 (N_0 - N) = K_0 (1 - e^{-\mu t}).$$
(84)

где К1 и К2- коэффициенты.

Полученное уравнение, характеризующее выделение энергии радиоактивного тепла, в основном совладает с уравнением (82), которое описывает одну из наблюдаемых закономерностей выделения сейсмичеокой энергии. Эта закономерность была установлена для некоторых последовательноотей афтершоков. В действительности такая последовательность афтершоков представляет цепь независимых между собой землетрясений, энергия в каждом из которых определяется общим напряженным состоянием твердой оболочки, зависящим от избыточного давления внутри Земли. Не случайно поэтому закономерность (82) справедлива для всех периодов активности, начиная от одних суток. В работе [12] верхний предел для этой закономерности установлей в SOO сут, хотя из общих соображений ограничения сверху не должно быть вообще.

Вторая группа землетрясений (афтершоков) : характеризуется уравнением (81), которое справедливо для ограниченного : диапазона периодов активности: от 100 до 600 сут.

Наличие сравнительно длинного минимального церкода может объяскяться двумя причинами. Во-первых, как отмечалось выше, при сдвиге вдоль плоскости разрыва вещество может плавиться, в результате чего перемещение вдоль разлома может продолжаться при напряжениях, заметно меньших допустимого напряжения на сдвиг при суком трении (критического напряжения). В результате текого перемещения может быть более глубокая разгрузка вещества вблизи очага, и для накопления энергии, необходимой для последующего разрушения оболочки, потребуется некоторое время. Однако последующее выделение сейсмической энергии должно описываться уравнением (82). Вовторых, возможно, что последующие земпетрясения (афтершоки) определяются процессом теплопроводностя, в результате которого тепло от очага основного землетрясения рассасывается и снижает прочность в окружающем пространстве. В этом случае выделение энергии землетрясений во времени будет определяться законом распространения по массиву некоторой Границы с определенной температурой, в то время как запас энергии имеется за счет уже накоппенных деформаций.

Рассмотрим вторую причину. подробнее. Допустим, что в некоторый начальный момент времени в очаге, где только что произошел сдвиг, вещество разогрелось до температуры T_1 . В окружающем пространстве температура равна T_0 и при етой температуре вещество при существующем поле напряжений не разрушается. Если теперь поднять температуру до некоторой величины T_2 , большей T_0 , но меньшей температуры T_1 , то разрушение станет возможным и при существующем поле напряжений.

Согласно уравнению теплопроводности, граница с некоторой температурой Т в случае центральной симметрии распространяется в окружающее пространство от очага по закону

 $R = r_0 + b\sqrt{t_i} \tag{85}$

где'r₀ - радиус начальной сферы; b - постоянная процесса.

Этим же уравнением будет определяться и распространение границы с критической температурой T_2 . Энергия, которая выделится вокруг очага, будет пропорциональна объему, который окажется внутри сферического споя с температурой T_2 , т.е.

$$E = K \left(R^3 - r_0^3 \right) = K \left[\left(r_0 + b \sqrt{t} \right)^3 - r_0^3 \right].$$
(86)

Если раднус $R \sim r_0$, то внергия будет пропорциональна разности $R - r_0$, $T_* e_* \sqrt{t_*}$

Реальный источник существенно отличается от сферического. При-Реальный источник существенно отличается от сферического. Приближенно его можно представить в виде плоского параллеленинеда. По сравнению с сферически симметричным очагом излучение тепла с торцевых граней такого параллеленинеда будет менее интенсивным

27-1

2436

во времени, т.е. объем среды в этих направлениях будет прогреваться медленнее, а в перпендикулярном направлении – быстрее. Другими сповами можно рассуждать так. На достаточно большом расстоянии *R* от очага его несимметрия перестанет играть роль и поверхность с заданной температурой должна иметь сферическую форму. Поскольку вблизи очага распределение температуры несимметрично, то для обеспечения симметрии на расстоянии *R* распространение заданной температуры перпендикулярно к плоскости очага должно идти с большей скоростью, чем вдоль плоскости.

Сейсмическая енергия при афтершоках за некоторое время после основного толчка определяется объемом, в котором за это время температура увеличивается до критического значения T_2 . Если считать мастом образования афтершоков периферию площадки сдвига основного очага, то объем, в котором произойдет разрушение вещества, будет определяться уравнением

$$V \sim T \Delta I,$$
 (87)

где П – периметр первоначального · очага; ΔI – расстояние, на которое распространилась температура T_2 . Отсюда следует, что сейсмическая енергия, которая выделится вокруг первоначального очага, будет пропорциональна

$$E_c \sim \Pi \Delta t_{l}$$
 (88)

В случае расположения очагов афтершоков в плоскостях, параллельных плоскости основного сдвига, сейсмическая энергия будет пропорциональна объему, прогретому в другом направлении, т.е.

$$E_{c}^{\prime\prime} \sim s \Delta I_{2},$$
 (89)

где в - площадь очага основного землетрясения.

Как видно из выражений (88) в (89), в побом случае сейсмическая внергия пропорциональна линейному размеру объема прогреваемого вещества. Следовательно, будет справед тво соотношение

 $E_{\rm c} \sim t^{\rm m}. \tag{90}$

Величина m, очевидно, не остается постоянной. Она зависит от степени симметрии первоначального очага и в зависимости от его геометрии может несколько изменяться. Если гипопентры афтершоков располагаются по периферии основного очага, то m < 0.5. При появлении разрывов в плоскостих, параллельных плоскости основного очага, показатель m должен быть больше 0,5.

Таким образом, окончательный вид зависимости для выражения сейсмической енергии афтершоков будет иметь вид

ADD

(00)

 $E_c = A + Bt^m$,

где A и B - постоянные.

Вернемся теперь к уравнению (81), которое, согласно работе[12], характеризует выделение энергии при некоторых последовательностях афтершоков. Напомним, что оно справедливо для периодов сейсмической активности в интервале 100 - 600 сут. В этом интервале ход зависимости энергии от времени, даваемый формулами (81) и (91),

практически одинаков. Так, отношение $\left(\frac{600}{100}\right)^m$ при m = 0,5 равно

2,45, а $\left(\frac{\lg}{\lg} 600\right)^2$ 1,9. Для полного совладения величина *m* должна равняться 0,36. Поскопьку показатель *m*, определенный тю фактическому закону выделения сейсмической внергии при некоторых последовательностях афтершоков, оказался меньше 0,5, то это означает, что плоскости сдвигов вещества при этих афтершоках должны располагаться примерно на продолжении площадки сдвига при основном толчке. Это представляется естественным, поскольку по периферии очага наиболее вероятна концентрация напряжений и, следовательно, в этом направлении действие теплового потока должно обладать наибольшей вффективностью.

Таким образом, наличие двух закономерностей выделения сейсмической энергии в последовательностях афтершоков отражает различия в процессах вокруг очагов землетрясений.

4.4.4. О механизме, определяющем структуру сейсмически активных зон на Земпе

Распределение сейсмически активных зон на поверхности Земли является крайне неравномерным. Как правило, ети зоны коррелируют с районами проявления активной техтонической деятельности, с которым связаны аномалии силы тяжести, тепловых потоков, электромагнитных явлений и другие аномалии. Понять структуру этих районов и законы их распределения чрезвычайно трудно. Однако неразрывная связь различных аномалий и их приуроченность к одным и тем же регионам свидетельствует о существовании единого источника, т.е. о наличии некоторого общепланетарного механизме, который определяет формирование всех тектонически активных зон.

Предпоженная выше модель очагов землетрясений позволяет высказать некоторые соображения об общих законах распределения тектонически активных районов, включая и зоны сейсмической активности. Поскольку источником всех движений в указанной модели принят процесс прогревания и расширения внутреннего вещества Земли, то все структуры на поверхности Земли (разломы, горные хребты, сейсмические пояса и т.п.) должны определяться поведением твердой оболочки, находящейся в условиях всестороннего растяжения. Такое

1

2436

00#7

представление позволяет смоделировать процесс образования некоторых структур с помощью пленок, покрытий или искусственных сферических оболочек, подверженных всестороннему растяжению. Удобной моделью, например, оказались асфальтовые покрытия. За счет различяй в деформациях етих покрытий и подстилающих оснований они оказываются в условиях всестороннего растяжения, и на поверхности асфальта наблюдаются характерные для такого напряженного состояния трещины. Структура и расположение етих трещин, как оказалось, кмеет много общего с характерные черты етих зон удалось также смсделировать с помощью искусственных сферических оболочек, растягиваемых изнутри избыточным давлением. Ниже: приведены некоторые результаты изучения процессов формирования тектонически активных структур, которые могут способствовать пониманию закономерностей проявления сейсмической активности Земли.

Трещины на асфальте. Асфальтовые покрытия обычно разбиты трещинами, и чем старше покрытия, тем многочисленнее эти трещины. По-видимому, специалисты-дорожники изучают их с целью выяснения причин образования и изыскания путей повышения сроков службы покрытий. Для нас существенными являются формы этих трещин. При всем кажущемся их многообразии можно выделить основные структурвые элементы, сочетание которых определяет все наблюдаемые типы трещин, Прежде всего характер трещин зависит от формы покрытий. На относительно вытянутых покрытиях, у которых продольные размеры L намного больше поперечных размеров . Д, вначале появляются поперечные трещины. Наиболее удобно вти трещины наблюдать на тротуарах, где их образование в минимальной степени связано с действием транспорта и определяется в основном внутренними напряжениями. Расстояние между соседними трещинами на одном и том же участке покрытия бывает различным. В табл. ЗО приведены расстояния, измеренные на шести участках. Методика измерения расстояний между трещинами состоит в следующем. На участках тротуаров для:ной 150 - 300 м производили измерения расстояний последовательно между соседними трещинами. Расстояния, которые группируются около определенных величин, усредняли между собой. В табл. 30 при-



Рис. 106. Схема напряженного состояния участка покрытия: 1 - асфальтовое покрытие; 2 -основание покрытия; 3 - распределение растягивающих напряжений вдоль покрытия ведены среднеарифметические значения и указаны среднеарифметические отклонения отдельных значений от средней величины. Из таблицы видно, что расстояния между соседними трещинами подчиняются вполна определенным закономерностям. Во-первых, на каждом участке выделяется по два-три значения, около которых группируются расстояния между соседними трещинами. Постоянство расстояния в

Таблица 30

Номер участ- ка	Среднее расстояние между соседними трещинами, м	Число примерно одинако- вых блоков на данном участке
1	22 ± 2,5	12
	12± 1,0	7
	6±1,0	2
2	9±0,5	2
	4,5± 0,5	6
3	15±2,0	6
	7 ±1,0	5
	4± 0,5	4
4	31 ± 2	2
	15,5± 3	5
	8,5 ±1	8
5	41	1
	20 ±2	9
	10, 5 ± 1	4
6	46±3	2
	20 ± 2,5	4
	11±2	6

пределах данной группы выдерживается с хорошей точностью. Вовторых, отношение расстояний в соседних группах на всех участках наблюдений сохраняется постоянным и равно двум.

Чтобы понять ети закономерности, рассмотрим скему на рыс. 106. Напряжения в асфальтовом покрытии обусловлены, очевидно, либо растяжением подложки, либо термонаприженнями в самом покрытии, возикающими при охлаждении горячего асфальта или за счет сезонных взмерений температуры. Независимо от природы напряжений их распределение вдоль покрытия должно иметь вид, показанный на рис. 106. Следует отметить, что полная картина распределения напряжений сложнее, чем показано на рисунке. Злесь важно то, что максимальное растягивающее напряжение будет в середине расоматриваемого участька. В полеречном направлении, очевидно, распределение напряжения аналогично приведенному на рисунке. Только максимальное значение напряжений од будет меньше од

По мере увеличения деформации покрытия эначения σ_L и σ_Δ будут возрастать, пока не достигнут прочности материала покрытия на растяжение σ_0 . Вполне очевидко, что при $L \gg \Delta$ это критическое состояние будет прежде всего достигнуто в поперечном сечении покрытия вблизи середины рассматриваемого участка.

После возникновения поперечной трещины образуется два участка длиной L/2, на каждом из которых произойдет перераспределение напряжений. По существу последующее поведение этих половинок будет независимым, и на каждой из них максимальное напряжение окажется приуроченным к их серединам. Эти напряжения по сравнению с σ_0 уменьшатся в 2 раза. Если растигивающая деформация покрытия будет продолжать увеличиваться, то со временем максимальные значения напряжений и в половинках могут превысить критическое напряжение σ_0 , и они, в свою очередь, разделятся пополам, образовав отрезки длиной L/4. Последующее нарастание деформаций приведет к возникновению отрезков длиной L/8, L/16, $L/2^m$. Спедует заметить, что разрушение покрытия может идти не только за счет увеличения его деформации, но и в результате старения материала и уменьшения со временом значения σ_0 . Закономерность разрушения покрытия но в результате старения материала и уменьшения со временом значения σ_0 .

После каждого следующего акта разрушения число отрезков, на которое разделяется первоначальный участок длиной L, удваивается, причем все они деформируются в дальнейшем независимо друг от друга. Если, однако, учесть, что материал покрытия и его скреплениег с подложкой обладают естественной неоднородностью, то время образования трещин в различных кусках может быть существенно различным. Поэтому в действительности удвоение числа кусков происходит не мгновенно, а только в течение определенного отрезка времени. В каждый же произвольный момент времени в пределах данного участка длиной L могут быть отрезки покрытия различной длины 1, которые тем не менее должны удовлетворять выражению

$$I = \frac{L}{2^m}, \qquad (93)$$

где т- целое число,

Поскопьку первоначальный размер L при наблюдениях существующих покрытий трудно определить, то формулу (96) можно привести к спедующему виду:

 $I = 2^{m} I_{0},$ (94)

где ¹0 - длина минимального отрезка на данном участке или минимальное расстояние между соседними трещинами, измеренное на некотором участке покрытия.

214

(93)

Данные табл. 30 полностью согласуются с формулов (94).

Описанный механизм разрушения покрытий справедлив до тех пор. пока продольные размеры вновь образующихся кусков остаются по крайней мере в 2 раза больше полеречных размеров, Как только эти размеры выравниваются, то характер деформирования и разрушения покрытий существенно усложняется. Наряду с поперечными трещинами возникают также продольные, причем параллельность трещин границам покрытия при втом исчезает. Трещины приобретают дугообразную форму и становятся ветвящимися. Это особенно наглядно видно на сравнительно больших площедках асфальтовых покрытий. Все это объясняется характером напряженного состояния покрытия. Пока справедливо соотношение L>>A, покрытие находится по существу в условиях линейного растяжения. По мере выравнивания L в Δ растяжение приближается к всестороннему, т.е. в каждой произвольной точке покрытия, удаленной от его границ, растягивающие усилия направлены равномерно во все стороны. В соответствии с этим изменением напряженного состояния меняется и характер образующихся трещин.

Чтобы яснее представить возможные варианты трещин, рассмотрим безграничное покрытие, в котором тем или иным путем создеются всесторонние растягивающие напряжения. Разрушение материала покрытия, естественно, произойдет при некотором критическом значении этих напряжений. Однако разгрузку напряженного соотояния материапа покрытия вблизи некоторой точки в случае всесторовного растяжения нельзя снять с помощью одной трещины. Минимальное число трещин, которые в состояние снять напряжения в данной точке, равно трем, причем эти трещины должны сходиться в этой точке под утлами, примерно равными 120°, Этот вариант образования трешин, очевидно, наиболее вероятен в случае сравнительно однородного материапа покрытия и равномерного поля напряжений. При наличии неоднородностей критические условия разрушения в различных точках могут возникать в разное время, а в данной точке - вдоль некоторой одной плоскости, в то время как во всех остальных плоскостих материал еще будет сохранять способность сопротивляться растагивающим усилиям. В этих условиях возможно первоначальное образование одной трещины. Развитие первоначального участка трешины может в принцине идти по прямой линии. Однако в материале покрытия всегда имеются неоднородности, которые способствуют нокривлению первоначальной трещины. Появление кривизны меняет однородность поля напряжений вблизи трещины. Со сторучы вогнутости напряжения, растигивающие материал вдоль трещины, уменьшатся, а со стороны выпуклости - увеличатся. В результате этого перераопределения напряжения первоначальная трещина будет стремиться сохранить овою дугообразную форму, а появление следующей новой трещины становится наиболее вероятным с одной ее стороны: со стороны выпуклости.

Таким образом, при всестороннем растяжении покрытия наиболее вероятно образование первоначальных : дугообразных или трехлучевых систем трещин, причем первые из них должны иметь тенденцию перерастать также в трехлучевую систему путем возникновения новой трещины со стороны выпуклости первоначальной трещины. 215
Рис. 107. Система трещин на относительно большом участке асфальтового покрытия

На рис. 107 показана система характерных трещин на сравнительно больших участках асфальтовых покрытий. По мере старения покрытия на нем появляются новые трещины, но в любой их комбинации можно всегда отчетливо проследить отмеченные выше закономерности образования новых трещин. Со временем все покрытие оказывается резбитым на целую систему отдельных участков (блоков), и чем старее покрытие, при прочих равных условиях, тем меньше на нем размеры отдельных блоков. При одинаковом возрасте покрытий степень растреокявания определяется, очевидно, его толщиной: чем меньше толцина, тем меньше прочность и, следовательно, тем сильнее растрескивание.

<u>Накоторые особенности отроения земной коры.</u> Одним из наиболее замечательных структурных элементов земной коры являются срединные океанические хребты, имеющие планетарные масштабы. С ними связаны наибольшие аномалии тепловых потоков с поверхности Земли, едоль рифтовых долин этих хребтов. протянущись пояса землетрясений, они характеризуются также магнитными и гравитационными аномалиями. Все эти данные указывают на несомненную молодость океанических хребтов, и ето привлекает к ним внимание исследователей.

В работе [13] приведены данные о структуре земной коры вдоль профила, перпендикулярного к Атпантическому океаническому хребту (рис. 108). Из них следует, что кора вблизи рифтовой долины и на склонах хребта карактеризуется глыбовым (блоковым) строением. Размеры отдельных блоков вдоль поверхности Земли различны. Однако сопоставление этих размеров между собой показало, что они не



Рис. 108, Блоковая структура земной коры вдоль профиля, перпендикулярного к Атлантическому срединному хребту: 1-блоки; 2 - нерасчлененная кора; 3 - мантия

являются случайными. Ниже приведены средние размеры блоков, измерешные по рис. 108, и число этих блоков

Размеры блоков, км.	450	144 ± 20	75 ±10	37 ±3	18	9
Чиспо блоков	1	8	9	2		-

Два минимальных размера (9 и 18 км) взяты из работы [13] и соответствуют ширине отдельных глыбовых гряд, протянувшихся вдоль океанического хребта. Из приведенных данных видно, что каждый следующий размер, если идти от малых значений к большим, получается из предыдущего путем его удвоения, т.е. для определения размеров блоков может быть использована формула (94). Исключение составляет один самый большой блок размером 450 км. Однако его можно представить как сумму двух блоков размерами 150 и 300 км, первый из которых соответствует группе блоков размером 144±20 км, а второй – удвоенному значению размерам 450 км, по-видимому, можно объяснить недостаточной детальностью геофизических исследований в месте его нахождения. С большой вероятностью внутри этого самого большого блока имеется граница, разделяющая его на две части. которая осталась незамеченной.

Характерной особенностью срединных океанических хребтов является также напичие поперечных разломов, которые разделяют их на отдельные участки [13]. Вдоль некоторых из этих разломов центральная рифтовая долина оказывается смещенной на десятки километров. По карте, приведенной в работе [74], для Атлантического хребта были измерены подряд расстояния между соседними поперечными разломами, подобно тому, как измерялись расстояния между соседними трещинами на асфальте. Значения этих расстояния между соседними трещинами на асфальте. Значения этих расстояния между соседними трещинами на асфальте. Значения этих расстояния между 536 – 18; 750 – 7. Максимальное расстояние между разломами для этого хребта равно 750 км. Однако в пределах Тихого и Индийского океанов имеются участки хребтов, на которых расстояние между соседними поперечными разломами составляет 1600 к 3200 км.

Приведенные данные вновь обнаруживают ту же закономерность, которая была отмечена выше: размеры отдельных участков не являются произвольными, а группируются около некоторых значений, кратных 2^m.

В процессе растрескивания земной коры вблизи срединных океанических хребтов, по всей вероятности, проявляется некоторый меха-

2436



Рис. 109. Общий вид расположения срединных океанических хребтов: 1 - хребты; 2 - материки

низм деформирования, аналогичный растяжению асфальтовых покрытий. Эта аналогия, как оказапось, не ограничивается только корой вблизи океанических хребтов. Достаточно даже беглого вэгляда на физическую карту мира, чтобы убедиться в более глубокой аналогии между поведением асфальтовых покрытий и земной коры. В качестве аналога трещинам на асфальте можно взять горные цепи на суше или поднятия на океаническом дне, представленные подводными хребтеми или островными дугами. Такая аналогия вполне естественна, поскольку горные системы, как правило, всегда связаны с глубинными разломами земной коры [16, 24, 29, 45]. Между трещинами на асфальте и поднятиями на Земпе нетрудно увидеть общность форм. В подавляющем бопьшинстве горные системы и поднятия на Земпе имеют трехлучевую или дугообразную форму. Это особенно наглядно видно на примере наиболее молодых образований; например, островных дуг и горных систем, с которыми соседствуют глубоководные желоба, поскольку они в максимальной степени сохранили первоначальный вид. При этом важно подчеркнуть общность этих форм независимо от абсолютных линейных масштабов поднятий. Так, многие островные системы вдоль западного

побережья Тихого океана образуют трехлучевые и дугообразные отруктуры, которые, в свою очередь, объединяются планетарной системой, также имеющей трехлучевую форму. Ее огромная дуга протявулась вдоль берегов Азии и Австралии, а третий пуч этой системы проходит между указанными материками и примыкает к основной дуге со стороны ее выпуклой части. Аналогичную систему образуют горные цепи Северной и Южной Америки, к которым примыкают с востока острова Карибского бассейна. Наконец, все материки на Земле, за исключением Антарктиды, кек бы расположились по трехлучевой системе. В каждом луче втой системы имеется по два материка; соответственно Северная и Южная Америка, Азия и Австралия, Европа и Африка. Первые четыре материка образуют общепланетарную дугу, к которой (и снова со стороны выпуклости) в районе северной полярной области примыкает третий "луч", включающий Европу и Африку.

Яркой демонстрацией общности форм трещин на асфальте и разпомов в земной коре является структура океанических хребтов (рис. 109). Если исключить масштаб и убрать с рисунка материки, между которыми протянупись эти хребты, то их погко принять за систему трещин на асфальтовом покрытии (см. рис. 107).

Модень Земли. Приведенные выше данные позволяют построить модель Земли в виде расширяющейся сферы " жидкого" вещества, имеющей твердую оболочку, которая имеет определенную прочность и может в течение некоторого времени сдерживать расширение внутреннего вещества. Источник расширения этого вещества очевиден к заключается в разогревании его радиоактивным теплом [12, 30]. Материал оболочки при этом оказывается в усповиях всесторонного растяжения. Поэтому характер ее деформирования и последующего разрушения качественно совпадает с поведением асфальтовых покрытий, находящихся в аналогичных условиях растяжения. На основе этой модели можно наметить спедующую схему развития Земли.

Представим себе некоторый начальный момент времени, когда на Земле имепась однородная твердая оболочка. При определенной степени разогревания внутреннего вещества, когда внутреннее давление превысило предел упругости оболочки, в некоторых ее местах соразовались зоны пластического течения. Форма этих зон обусповлена усповием всестороннего растяжения оболочки и должна быть анапогична форме трещин на больших участках асфальтовых покрытий. Посне появления зон пластического течения деформирование обопочки утрачивает равномерность. Расширение внутреннего вещества становится наиболее вероятным за счет вспучивания оболочки на участках пластического течения, которое неизбежно должно завершаться прорывом оболочки и излиянием внутреннего вещества на поверхность. гидростатического дав-При этом внутреннее давление снижается до ления, а излившееся на поверхность вещество застывает и в некоторой степени укрепляет разломы. Аналогичное явление можно наблюдать, например, при замерзании воды, изливающейся по трещинам во пьду. Поскольку радиоактивный распад элементов происходит непрерывно, то через некоторое время внутри Земли вновь повышается давление, и оболочка снова оказывается в усповиях всестороннего растяжения.

28 - 2

00111

24.36

Благоларя застыванню внутреннего вещества, изпивающегося по разломам в оболочке на поверхности, и непрерывному выделению радирактивного тепла, развитие Земли должно иметь циклический характер. Однако деформирование оболочки в последующих циклах уже будет зависеть от характера се разрушения и укрепления в предыдущих диклах. Если укрепление старых разломов оказалось недостаточным, то в последующем дикле прорыв оболочки будет происходить вблизи них. В случая достаточного их украпления становится более вероятным образоваяне новых разпомов. Все развитие Земли можно представить как поспедовательное укрепление наиболее спабых участков твердой оболочки. Внутреннее вещество, подобно некоторому "мастеру", находит в оболочке спабые места и прорывает их. За счет излияний внутреннего вещества эти места укрепляются, и очаги извержений перемещаются в новые места. Положение новых очагов прорыва каждый раз опредепяется всей предысторией развития Земли, а также имеющимся различнем физико-географических усповий на отдельных участках ее поверхности, которые влияют на формпрование твердой оболочки.

В рамках предлагаемой моделя находят качественное объяснение основные геологические и геофизические явления. Так, например, срединные океанические хребты следует рассматрявать как начальные стадии формирования новых глубинных разломов. Первоначально на их месте возникло пластическое течение твердой оболочки. Под оболочкой поизмается верхняя часть мантии топщиной около 700 км. В нее же входит и земная кора. Поспедняя, очевядно, является более хрупкой по сравнению с основной частью твердой обоночки, что и определяет характер ее разрушения в местах возникновения пластического течення твердой оболочки. Судя по тому, что кора растрескивается как вдоль, так и поперек океанических хребтов, можно заключить, что зоны пластического течения имеют планетарные масштабы. Они протянулись в виде сравнительно узких извилистых лент по всей поверхности Земли, разделив ее на крупные блоки. За счет пластического течения материала твердой оболочки в этих зонах кора испытывает усиленное дробление на блоки. По ним же, как наиболее спабым местам, происходит вспучивание оболочки, которое в будущем Завершится ее прорывом и излиянием внутреннего вещества на поверхность.

Наиболее молодые зоны Альпийской складчатости связаны с разпомами твердой оболочки в предыдущем цикле, которые в настоящее время проходят заключительную стадию своего укрепления. Глубокофокусные землетрясения в этих зонах связаны как раз с выжиманием внутреннего вещества по этим старым разломам. И именно по глубинам расположения очагов землетрясений можно судить о глубине проникновения разломов и, следовательно, о той части мантии Земли, которая сопротивляется расширению внутреннего вещества и которую можно считать твердой оболочкой.

Моделирование процессов сазвития Земли. На основании представпения о Земле как о сфере, расширение которой сдерживается твердой оболочкой, предпринята попытка решить некоторые вопросы путем постановки модельных экспериментов. Основой модели является

C

C



Рис. 110. Поверхность сферического слоя парафина равной толщины после его растрескивания при толщине слоя: a - 0,1 - 0,2 мм; 5 - 0,5 - 0,6 мм

сферическая резиновая камера, в которую накачивался воздух и раздувал ее до диаметра около 200 мм. После этого на поверхность камеры наносили в расплавленном состоянии слой парафина, который быстро застывал. При последующем повышении давления внутри камеры происходило растрескивание этого слоя. Характер растрескивания существенно зависит от топщины слоя парафина и степени его однородности.

В процессе моделирования ставилась задача воспроизвести форму разломов, которые возможны в земной коре при растяжении оболочки в зависимости от ее толцины и характера неоднородностей. На рис. 110, а и б приведены фотографии поверхности модельных сфер при различной толщине слоя парафина. Полученные результаты носят пока сугубо качественный характер и их нельзя еще использовать для установления количественной связи между толщиной твердой оболочки Земли и характером образующихся разломов. Однако качественный ре-

0077

зультат очевиден: с увеличением толщины твердой оболочки число разпомов должно уменьшаться, а их линейные размеры - возрастать, При малой ее толщине разпомы должны густо покрывать поверхность Земли и обеспечивать сравнительно равномерное наращивание слоя земной коры. С увеличением топщины твердой оболочки системы разломов непабежно должны прийти к трехлучевым структурам, пример которых показан на рис. 110, б. Интересно обратить внимание на тот факт. что вблизи трешин на рис. 110, б парафии вспучился и отделился от попложки. Зона вспучивания на фотографии отчетливо обозначена посветлением вблизи трещин, которое имеет характерную треутолькую форму. Указанный факт связан с явлением снятия напряжений в слое парафина после образования системы трешин. При возникновении попрбной системы трещин в твердой оболочке Земли, очевидно, зона разгрузки будет иметь аналогичную форму. Она будет характеризоваться пониженной прочностью оболочки, и в ее пределах наиболее вероятны последующие прорывы внутреннего вещества на поверхность. В процессе излияния этого вещества через такую систему разломов с нанбольшей вероятностью будут возникать полнятия треугольной формы. Можно с большой уверенностью предположить, что преобладание треутольных форм у современных материков объясняется именно структурой разломов в твердой оболочке. Если при этом учесть, что на Земле наиболее однородной является кора океанического типа, а континенты занимают только около 1/3 всей поверхности планеты, то можно прийти к выводу, что океаническая кора образовалась в то время, когда твердая оболочка была относительно тонкой. Соответственно образование континентов логично связать с тем периодом развития Земли, когда толщина оболочки возросла. А поскольку континенты в их современном виде возникли сколо 100 млн. пет назад, т.е. они являются молодыми, то можно заключить, что развитие Земли в целом идет в направлении постепенного утолдения твердой оболочки.

4.5. Вопросы пиженерной сейсмологии

4.5.1. Сейсмические наблюдения при правобережном взрыве в Медео

Основной целью сейсмических исследований в ближней зоне взрыва было изучение макросейсмического эффекта взрыва (оценка размеров сейсмоопасной зоны, изменение интенсивности сотрясения с расстоянием) и исследование процесса формирования сейсмических воли в условиях направленного взрыва и сложного рельефа.

Большой комплекс инженерно-сейсмических наблюдений на зданиях в г. Алма-Ате проводился несколькими организациями по общей программе.

Наконец, записи взрыва на больших расстояниях (20-300 км) были использованы для решения ряда сейсмологических задач (изучение строения земной коры, сценко магнитуды взрыва и т.д.).

Система наблюдений состояла из 24 пунктов, равномерно распределенных на расстояниях от 1,1 до 20 км от места взрыва, из них 13 пунктов – в полевых условиях. В каждом пункте наблюдения велась регистрация трех компонент смещения почвы: вертикальной z, радиальной x и тангенциальной y. В ближней зоне датчиками являлись сейсмографы ВБП, СЭС и опытный комплект СМ-2, на больших расстояниях применялись сейсмографы СВКМ и СК, ВЭГИК. Усиление аппаратуры в каждой точка было установлено в соответствии с сжидаемыми согласно расчету смещений.

Кроме указанных 24 пунктов, специально развернутых для регистращих взрыва, на расстоянии от 40 до 300 км в наблюдениях участвовало еще 13 сейсмических станций КСЭ.

Сейсмологическая характеристика взрыва. Абсолютный момент первого взрыва – О4 ч 59 мин, 59,1 с и второго взрыва – О5 ч ОО мин 02,7 с Гринвичского времени. Временной интервал между первым и вторым взрывами составил 3,56 с. Вступления продольных воли от первого и второго взрывов уверенно разделяются во всех точках наблюдения.

Для энергетической характеристики землетрясений по записям на эпшентральных расстояниях до 300 км наиболее употребительной является шкала КСЭ. В этой шкале сейсмические события классифицируются по потоку сейсмической энергии через сферу радиусом 10 км. По данным 20 сейсмических станций КСЭ энергетический класс первого взрыва равен 11,4 ±0,2, второго – 11,8 ±0,2.

Магнитуда, в основе которой лежит погарифм отношения w/T для продольных волн, определяли только для второго вэрьша. По данным 10 станций ЕСС на расстоянии от 600 до 4000 км магнитуда равна 5,1± 0,2. Магнитуда, определяемая по отношению w/T в поверхкостных волнах¹, равна для второго вэрьша 3,7±0,2.

<u>Динамические характеристики основных волн.</u> В бижней к очагу взрыва зоне наиболее интенсивными являются продольные и поверкностные волны. В группе продольных волн на ряде записей четко выделяются две слагающие – низкочастотная и высокочастотная, разделяющиеся по периодам в 3 – 5 раз и вступающие практически одновременно.

Для оценки ожидаемого макросейсмического эффекта и для оптимальной настройки сейсмической аппаратуры важно было предвычислить динамические характеристики основных воли, а также оценить силу сотрясения в баллах.

Для оценки скорости колебаний высокочастотной Р-волны использовалась формула

1 Здесь поверхностной (релеевской) волной считается поперечная волна, калучаемая на второй стадии развития вэрыва. Низкочастотная продольная волна также обусповлена второй стадией излучения волн.

$$v = 700 \left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^2,$$

где v – скорость смещения, см/с; Q – масса заряда, кг; R – расстояние рассматриваемой точки от пункта вэрыва, м.

Для оценки параметров низкочастотной Р-волны использовалась имеющая более сложный характер зависимость максимальных амплитуд смещений от расстояния и массы заряда, полученная по наблюдениям над взрывами зарядов массой 2,8 и 17 т, произведенными в Медео 7 сентября 1965 г. По записям этих двух взрывов можно быпо оценить коэффициент *m* в зависимости амплитуды *w* от массы заряда 0

$$w_1 = w_0 \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)^m. \tag{96}$$

Экстраполируя эту зависимость, можно вычислить амплитулы при вэрыве заряда массой 3,6 кт. В исследованиях у разных авторов величина *m* изменяется от 0,7 до 1,4. По записям пробных взрывов в Медео величина *m* в среднем равна 1,1. Исходя из этого значения *m* и амплитуд записи спабых вэрывов были вычислены ожидаемые при большом взрыве амплитуды скорости инэкочастотной Р-волны.

Ожидаемые смещения (мм) в релеевской волне вычисляли по формуле

$$w = \frac{2Q^{1/3} \exp(-1.75 \bar{R}^{0,2})}{R^{0,5}},$$
(97)

rge R = R/01/3.

Перноды в релеевской волне оценивали по формуле

$$T = k_1 k_2 Q^{1/6} R, (98)$$

где коеффициенты k_1 и k_2 зависят от вида грунта. Для скальных пород коеффициент k_1 изменяется от 0,006 до 0,035 и k_2 – от 0,45 до 0,20. Максимальную скорость в релеевской волне рассчитывали исходя из соотношения $y = 2 \pi w/T$.

Такие оценки позволяют получить скорость или смещения для хороших грунтов. Однако в зависимости от рельефа местности или в неблагоприятных грунтовых условиях можно ожидать значительное возрастание амплитуд, что и было отмечено уже во время предварительных наблюдений в астрономической обсерватории. Видимо, возрастание амплитуд было вызвано как мощным слоем осадочных пород, на котором стоит обсерватория, так и расположением ее на купольной

(95)



Рис. 111. Изменение с расстоянием максимальных массовых скоростей в продольной высокочастотной (а), низкочастотной (б) и поперечной (поверхностной) (в) волнах в пунктах установки приборов; 1 - Медео; 2 - дом отдыха "Просвешенен"; 3 - минная станция; 4 - Дом отдыха № 2 СМ КазССР; 5 - Астрофизическая обсерватория; 6 - Алма-Ата; 7 - Талгар; 8 - Ахсай; 9 - туристская база "Горельник"; 10 - р. Сары-Сай

структуре, где концентрация энергии сейсмических воли происходит за счет фокусировки боковыми склонами.

В случаях, когда прибор устанавливали на скальный грунт, фак-

29-1

тические амплитуды хорошо совпадали с вычисленными (рис. 111). Зато, как это и ожидалось, резко завышенными по сравнению с ними были амплитуды в пунктах с лессовидными грунтами. Так, в астрономической обсерватории амплитуды скорости колебаний оказались равными 5 см/с, т.е. примерно в 7 раз больше, чем ожидались на этих расстояниях (0,7 см/с). В г. Алма-Ате на сейсмической станции (ул. 8-го марта) амплитуды тоже значительно (в 6 раз) превышали ожидаемые.

Периоды колебаний воли почти не изменяются с расстоянием. Высокочастотная продольная волна имеет период, в среднем равный 0,14 с, который изменяется в разных пунктах от 0,06 до 0,20 с, длиннопериодная волка – от 0,25 до 0,7 с и в среднем составляет 0,35 – 0,40 с, что совпадает с ожидаемыми. Периоды поперечных и поверхностных воли с расстоянием увеличиваются пропорционально корню кубическому из расстояния, тогда как периоды продольных воли остаются практически постоянными.

Сейсмические данные указывают на несколько меньшую сейсмическую эффективность второго взрыва (массой 3,6 кг) по сравнению с первым (массой 1,6 кг). Это видно из того, что соотношение амппитуд смещений второго и первого взрывов в среднем равно 1,6, тогда как должно составлять 2,2 – 2,3. Причина снижения эффективности второго взрыва заключается, видимо, в создании первым взрывом ослабленной зоны вокруг заряда второго взрыва.

<u>Макросейсмический эффект.</u> На основании ожидавшихся значений скоростей колебания грунта были сделаны прогнозы ожидаемой разрушительной силы вэрыва .(балльности) для близлежащих населенных пунктов и г. Алма-Аты. При переходе от скорости к баллу использовалась шкала Медведева (1964 г.), разработанная применительно к взрывам (табл. 31).

Как было сказано выше, прогнозируемые значения скоростей колебаний удовлетворительно совпали с фактически наблюдавшимися. Однако прогноз разрушительного действия вэрыва (см. табл. 31) оказался оправданным лишь для пунктов, находившихся на расстоянии более 6-8 км от вэрыва. Для блюкней же зоны (в данном случае для расстояний менее 3 км) оценка действия вэрыва оказалась завышенной, причем тем сильнее, чем меньше расстояние до вэрыва. Ниже приведены результаты обследования близлежащих населенных пунктов.

Группа из трех зданий на расстояния 400 м от взрыва получила заметные повреждения. Здание селевой станции, впоследстии сгоревшее, судя по фотографии и осмотру вскоре после взрыва, сохранило почти всю штукатурку, трубы не развалились. Даже после пожара устояла одна печь с трубой. Второе каркасно-камышитовое здание имело значительные повреждения, но не обрушилось. Четыре печи одноэтажного шлакобетонного здания имели значительные повреждения. Две трубы из четырех упали. Видны сквозные трещины кирпичных перегородок и несколько тонких трещин в наружных стенах. Такие разрушения могут быть вызваны землетрясением силой 7-8 баллов по шкале МК-1964.

Основная часть поселка Медео около 40 одноэтажных домов, на-

Таблида 31

_	Расстояние,	Сейсмический балл		
Тункт	45176	Прогноз (по скоростям)	Фактический (по макросей- смике)	
Здание селевой станции	0,4	10-11	7-8	
Дом отдыха "Х лет Казах- стана"	1,1	8	6	
Поселок Медео и турбаза "Горельник"	1,4-1,8	7	5-6	
Дом отдыха "Просвещенец"	2,2-2,5	6	5	
Астрономическая обсервато- рия	7	6-7	5_6	
г. Алма-Ата	10-20	2-5	2-5	

ходящаяся вне Дома отдыха, т.е. далее 1300 м, повреждений не попучила. Осмотрены были все дома. Лишь в трех из них имеются петине повреждения? трещины в глиняной штукатурке и откалывание небольших ее кусков. Судя по этим данным, сотрясение в поселке, вне Дома отдыха, может быть оценено в 5 баллов.

Несколько жилых корпусов Дома отдыха "Медео" (1000-1300 м)кархасно-насыпные или камышитовые дома – получили повреждения умеренной силы. Для них характерно растрескивание глиняной штукатурки с частичным ее откалыванием, повсеместные трешины в раздепках печей. Трубы все целы. Это соответствует по шкале МК-1964 землетрясению силой 6 баллов. В двух наиболее близких к вэрыву (около 900 м) маленьких частных жилых домах наблюдались серьезкые повреждения: частично разрушились печи, значительная часть штукатурки внутри дома к снаружи обвалилась. Для этого небольшого участка сотрясение оценивается в 7 баллов.

Одиночное здание метеостанции "Горельник" (1400 м) получило значительные разрушения печей с частичным вышалом кусков штукатурки. Трубы и стекла остались целы (6-7 баллов).

На турбазе "Горельник" (1600 – 1800 м) в щитовых деревянвых домах отмечены лишь слабые трещины в разделе печей и осывалась побелка. Повреждения умеренной силы отмечены только в одном глинобитном здании (5 баллов).

Дом отдыха "Просвещенец" (2,2 – 2,5 км) состоит из одноэтажных каркасно-камышитовых или саманных домов. Здесь появились пишь трещины в штукатурке и в одном случае повреждена печь в глинобитном доме. Сила сотрясения 5 баллов.

29-2

2436

Астрономическая обсерватория находится от взрыва на расстоянии 7 км на неблагоприятных грунтах. На одновтажных каменных новых домах никаких повреждений не отмечено. Находившиеся там наблюдатели-сейсмологи почувствовали раздельно два резких толчка продольной волны и плавные горизонтальные колебания, связанные с поверхностной волной. Сила толчка оценена ими в 5 – 6 баллов.

В доме отдыха "Турксиб" (9 км) в одновтажных каркасно-камышитовых, саманных домах отмечены пншь нитевидные трещины в штукатурке (4 – 5 балпов).

В пределах Алма-Аты (10-20 км) оценку сейсмического воздействия приходится вести главным образом по признакам ощутимости толчка. При втом следует иметь в виду, что население знало о предстоящем вэрыве, однако в некоторых районах его не чувствовали совсем (2-3 балла). Однако в то же время отмечались отдельные случаи появления слабых повреждений в виде трещин в штукатурке, особенно в месте стыка секций крупноблочных домов. Это свидетельствует о том, что в городе могли быть отдельные участки, где сотрясеные достигало 5 беллов.

На сейсмической станции Тангар (17 км), расположенной в горах, находящиеся в ожидании землетрясения наблюдатели отметили ечень слабый толчок (2-3 балла).

Наибольшее расстояние, с которого поступали сообщения об ощутимости землетрясения, – 40 км (поселок Иссык).

Итак, обследование показало, что в ближней зоне сейсмический эффект вэрыва был неожиданно слабым. Различие между фактически проявившейся разрушительной силой взрыва и оценкой ее по шкале Медведева составляло 1 балл на расстоянии в 2 км (скорости порядка 5 см/с), 1,5 – 2 балла для 1 км (скорости 15 см/с) и даже 3 балла на расстоянии 300 – 400 м от взрыва (скорости порядка 100 см/с).

По-видимому, в области сильных сотрясений при вэрывах, в отличие от землетрясений, удвоение значения колебательной скорости не приводит еще к увеличению силы сотрясения на один балл. С одной стороны, здесь сказывается кратковременность сейсмического воздействия вэрыва. В ближней зоне вэрьва основная энергия объемных продольных воли содержится в полуцикле колебаний, а поверхностных воли - в одном цикле колебаний. Максимальная же фаза землетрясеиий всегда содержит несколько циклов колебаний. С другой стороны в ближней зоне форма колебаний в объемной волне асимметрична: волна сжатия имеет большую амплитуду, чем волна разрежения. Известно, что материалы обладают большей прочностью на сжатие, чем на растяжение. Оба вти фактора существенны только в ближней зоне, и их действие ослабевает по мере удаления от эппцентра вэрыва.

4.5.2. Оценка сейсмического воздействия крупных вэрывов на гидросооружения в ближней зоне

Варывной метод строительства плотин имеет ряд особенностей. К или относится прежде всего вопрос с возможности вообще создавать 228

таким способом крупные плотины, который особенно обостряется, когда речь идет о создании водонапорной плотины, так как в этом спуцае важное значение приобретает фильтрация воды через тело плотины. К числу важных вопросов спедует такжа отности безопасность проведения крупных взрывов как для окружающих на селенных пунктов, так и для гидросооружений, соседствующих о местом взрыва. Перечисленные вопросы были предметом изучения при вэрывах в Медео и Байпазе. Ниже будет рассмотрея вопрос о параметрах сейсмического воздействия вэрывов в непосредственной близости от места их проведения. Практическая важность этого вопроса не вызывает сомнения, поскольку при вэрывном способе создания плотин в зоне вэрыва всегда оказываются важные гидротехнические сооружения (тоннели, каналы и т.п.). сохранность которых должна быть гарантирова-RA.

Как показано выше, вэрыв вблизи свободной поверхности может быть представлен в виде двух источников. Первоначальное действие вэрыва на окружающую среду состоит в сферически симметричном ударе, который производят продукты детонации ВВ. В результате етого удара образуется волна сжатия. Вблизи - ето волна пластических и упруго-пластических деформания. По мере распространения амплитуда напряжений в волне падает и она переходит в упругую волну.

Вторым источником воли является куполообразное поднятие породы в районе выхода п.н.с. на свободную поверхность. В процессе етого поднятия в окружающую среду излучается две волны - поперечная и волна растятивающих напряжений. Поскольку время куполообразного поднятия породы определяется действием продуктов взрыва и инерционными силами, то оно оказывается всегда больше длительности изпучения волны скатия. Поэтому цернод колебаний в волнах, излучаемых на стадии куполообразного поднятия породы, оказывается больше периода в волне сжатия.

С точки зрения воздействия на сооружения, расположенные в непосредственной близости от заряда, основной интерес предотавляет волна сжатия. Две другие волны, а также возможные волны отраженного типа могут предотавлять интерес на больших расстояниях и здесь не рассматриваются.

Волна сжатия в первом приближении может быть представлена в виде одиночного импульса, который характеризуется временем действия, временем нарастания напряжений в амплитудой, под которой подразумевается максимальная массовая скорооть, смещение, ускорение или напряжение. Наиболее употребительной характеристикой амплитуды волны сжатия является массовая скорость. Удобство использования втой характеристики состоит в том, что она, с одной стороны, является довольно устойчивой и слабо зависят от свойства среды, с друмассовая скорость действительно является гой, - максимальная важным параметром, определяющим сейсмическое воздействие взрыва на многие сооружения.

Измерение параметров волны сжатия проводвлось в различных усповиях. Наиболее подробное исследование было выполнено при взрывах в крепких мраморизованных известняках. Для основных параметров

29-3

2436

этой волны оказался справедливым геометрический закон подобия, что позволило получить формульные зависимости в безразмерных координатах. Максимальная массовая скорость в волне сжатия может быть описана емпирической формулой (12). Интересно отметить, что практически такая же формула была получена при вэрывах в песке [52].

Продолжительность действия положительной фезы волны сжатия для данного вэрьва мало изменяется с расстоянием. При изменении относительного расстояния от 3 до 10 м/кг^{1/3} продолжительность действия увеличивается от 0,3 до 0,5 мс/кг^{1/3}. В первом приближении она может быть принята постоянной

 $t_{\perp} = (0,4 \div 0,5) Q^{1/3}$

Фронт волны сжатия не является ударным, как это имеет место при вэрывах в воде и в воздухе. Нарастание напряжений в волне сжатия происходит постепенио. Чем ближе точка наблюдений к заряду, тем время нарастания $t_{\rm H}$ меньше. На границе заряда нагрузка прикладывается практически мгновенно и время нарастания должно равняться нулю. На расотоянии 100 м для вэрьва заряда массой 1 т время нарастания составляет примерно 2 мс. Зависимости $t_{\rm H}$ от массы заряда ВВ не обнаружено. Величина времени нарастания сильно зависит от степени трещиноватости породы. С этим обстоятельством, очевидно, связано наличие сильного разброса в значениях $t_{\rm H}$.

Максимальные смещения в волне сжатия для разлячных по мощности взрывов подчиняются принципу геометрического подобия – формула (13). Эти значения параметров волны сжатия были получены при вэрывах сосредоточенных зарядов в крепких и сравнительно однородных скальных породах. В случае одновременного вэрыва нескольких зарядов оценка параметров волны сжатия может быть получена геометрическим суммированием действия отдельных зарядов.

Вэрывы на Малой Алмаатинке проводились в гранитах. Непосредственного измерения параметров волны сжатия при вэрывах в Медео провести не удалось. Однако некоторое представление о них можно получить по начальной скорости движения свободной поверхности в районе выхода линии наименьшего сопротивления, которая является удвоенным значением максимальной скорости в волне сжатия. Одеяка начальной скорости по данным киносъемки показала, что для гранитов может быть использована зависимость, полученная для мраморизованных известняков.

Сравнительно подробные измерения параметров волны сжатия удапось провести при взрывах в Байназах. Массив горной породы, в которой проводились эти взрывы, представлен сильнотрешиноватыми известняками. В результате измерений удалось получить зависимость максимальной массовой скорости (м/с) от расстояния и массы заряда, которая может быть приближенно выражена формулой

$$v = 6,3 \left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{2,5}$$

(100)

(99)

Солоставление с формулой (12) показывает, что затухание волны жатия в известняках происходит более интенсивно, что, очевидно, аязано с его повышенной трещиноватостью. Длина волны скатия (продоржительность положительной фазы) в трещиноватых известняках придерно в 1,5 раза больше, чем в крепких мраморизованных известяках.

Сравнение данных по взрывам в различных породах показывает, по параметры волны сжатия зависят от свойств етих пород. Однако па оценочных расчетов в скальных породах различного типа параметы волны сжатия могут быть определены по формулам, полученным ля мраморизованного известняка.

Такам образом, приведенные данные о параметрах волны сжатия рэволяют задать воздействие, которое окажет вэрыв на сооружения коложней зоне. Следовательно, определение степени воздействия прыва на гидросооружения оводится к решению задачи о взаимодейтвия волны сжатия к сооружения.

Гидротехническими объектами сейсмического воздействия в Медео і Байпазах являлись в основном водоотводные тоннели с бетонной обвлкой. Решение о напряженном состоянии в обделках различной форы при воздействии сейсмических воли, в законченном виде допусающем техническое его использование, в настоящее время отсутстует. Для прогнозирования сейсмического действия на обделки горных ыработок используется поэтому емпирический метод критических ассовых скоростей колебаний в падающей сейсмической волне, при оторых достигается та или иная степень повреждений. Первичлые овреждения обделки в виде трещии обусловлены, очевидно, появленим напряжений, превышающих временное сопротивление растяжению натернала обделки. Напряжения в упругой плоской волне выражаются, ик взвестно, формулой

$$\sigma = \rho V C_{s}$$

(101)

юторую можно использовать с учетом бытовых напряжений на конуре обделки для оденки критических скоростей [78]

$$-2,67 \mu_{\Pi} \rho_{\Pi} H + \frac{\rho c v_{\mu} \mu_{06}}{1 - \mu_{06}} = \sigma_{\ell}$$
(102)

0047

$$v_{\rm Kp} = \frac{(\sigma_t + 2.67 \,\mu_{\rm R} \,\rho_{\rm R} H) \,(1 - \mu_{\rm 0.6})}{\rho_{\rm 0.6} \,c \,\mu_{\rm 0.6}},\tag{103}$$

 чкр - критическая скорость; σ_t - временное сопротивление
 астяжению; μ₁ ; μ₀6 - коефициент Пуассона горной породы и обелки; ρ₁ - плотность горной породы; Н - глубина заложения выраотки; р₀6 - плотность материала обделки; с - скорость звука в мавудале обледки.

Для бетонных обделок. больших пролетов критическая скорость при-Для бетонных обделок. больших пролетов критическая скорость при-Змается обычно в пределах 1,5 - 2,0 м/с. Измеренная на обделке Запазинского тоннеля максимальная скорость равиялась 1 м/с, при ¹⁰М никаких серьезных повреждений не наблюдалось. 231 В целом опасность сейсмического воздействия вэрыва в блыжней зоне не стоит преувеличивать. Опыт промышленных вэрывов в Медео и Байпазе показал, что крупные вэрывы могут проводиться вблизи важных гидротехнических сооружений при их полной сохранности. Это ивляется дополнительным доводом в пользу того, что высокие каментонабросные плотины при строительстве гидростанций могут создаваться вэрывным способом.

4.5.3. Влияние типа забойки на параметры сейсмических волн при вэрывах на склоне

Измерение параметров сейсмических воли производилось в опытах с зарядами массой 5, 7, 10, 85 и 100 т. Заряды массой 5, 10 и 100 т были взорваны с обычной забойкой из раздробленной породы; заряды массой 7, 10 и 85 т - с комбинированной забойкой. Основной задачей сейсмических наблюдений при указанных взрывах было изучение влияния забойки на параметры сейсмических волн. Повтому число точек измерений было ограничено, причем регистрация в отдельных точках велась автономно без единой привязки по времени. Измарения при взрывах с разными типами забойки производились в одных и тех же точках, что позволяет сравнивать не только средние значения параметров, но и результаты показаний конкретных приборов. Непосредственно в опытах записывалась массовая скорость колебаний поверхности Земли, Поскольку основной задачей наблюдений ивляпось сравнение сейсмических сигналов при взрывах с различными типами забойки, то характер места установки сейсмоприемников не имел существенного эначения: приборы устанавливались как на коренных породах, так и на наносном слое.

Первичные данные измерений параметров воли приведены в табл. 32. Сравнение волновых картин производилось по двум типам волн: по волне сжатия, представленной на осциллограммах первым вступлением, и по иизкочастотным колебаниям, в которых объединены волна разрежения и поперечная волна, излучаемые на стадии куполообразного поднятия поверхности склона.

На рис. 112, а приведена зависимость полного вектора максимальной массовой скорости в волне сжатия от приведенного расстояния. Поскольку для волны сжатия наиболее характерна х -составляющая движения, то на рис. 112, б приведена отдельно аналогичная зависимость для этой составляющей скорости. Для удобства сопоставления данных на рис. 112, а и б, а также на рис. 112, в линиями соединены точки, соответствующие скоростям в одних. и тех же пунктах регистрации при вэрывах с различными типами забойки.

Сплошной линией на обоих рисунках показана зависимость, жарактеризующая изменение скорости в волне сжатия от расстояния при вэрывах на выброс - формула (12).

Опытные точки, как видно из рис. 111 и 112, обнаруживают довольно большой разброс. Тем не менее, из их распределения можно сделать некоторые вызоды.



Рис. 112, Зависимость полного вектора массовой скорости в волне скатия (a), горизонтальной составляющей массовой скорости в волне, скатия (5), максимальной скорости низкочастотных колебаний (в) от приведенного расстояния

1. Характер изменения скорости с расстоянием при взрывах на склонах и на горизонтальной свободной поверхности примерно одинаков. По абсолютной величине опытные точки в основном располагаются ниже прямой линии, соответствующей формуле (12). По-видкмому, при взрыве на склоне горы, приподнятой нац уровнем горизонтальной свободной поверхности, в волну сжатия излучаетоя меньше энергии, чем при взрыве вепосредственно у горизонтальной поверхности. Последующее же распространение этой энергин происходит, очевидно, в соответствии с законами расходимости, что и обеспечивает примерно одинаковые степени затухания ампінитуды волны с расстоянаем при взрывах на склонах и у горизонтальной свободной поверхности.

Масса заряда, т	Тип эа- бойки	Номер точки ре- гистра- ции	Тип при- бора	^v рж, см/с	^V _{ру} , См/ с	v _{рz} , см/ с
		1	ВИбА	0,57	0,40	-
		1	C5C	0,42	0,48	0,38
5	Обычная	2	C5C	0,1	-	0,43
		3	C5C	0,1	-	0,11
		4	C5C	0,05	-	-
		1	ВибА	0,69	0,22	-
		1	C5C	0,48	0,19	0,22
7	Комбинир	10-2	C5C	0,08	-	-
	ванная	3	C5C	0,15	0,04	0,24
		4	C5C	-	-	
		1	ВибА	15,6	2,9	-
		1	C5C	13,3	4,0	6,7
100	Обычная	2	C5C	1,4	0,3	-
		3	C5C	1,25	0,45	1,84
		4	C5C	0,02	0,03	0,5
		1	ВибА	7,0	1,3	-
		1	C5C	6,2	1,5	4,0
83	Комбини- рованная Обычная	2		0,9	0,17	-
		3		1,4	0,5	2,3
		4		0,02	0,05	0,55
		1		2;25	1,1	1,81
		2		5,7	1,1	2,8
10		3		0,36	_	0,44
		4		0,38	0	0,42
		5	-	0,18	0,2	0,18
		1	*	4,2	-	-
		2		7,6	2,3	3,1
10	Комбини	3		0,45	0	0,50
-	ровалиян	5		0,44	0,32	0,48

Таблица 32

^t +х , мс	.t+z ∙ MC	^{•v} RX • см/с*	VRy CM/C	^v Rz* см/с	^v р' см/с	v _R , см/с	Рассто- яние, м
	-	-	-	-	0.77		230
72	46		-	-		-	230
-	-	0,95	0,2	-	0.43	_	496
-	52	0,12	0,15	0,12	0.14	0.22	950
-	-	-	-	_	-		1910
-	-	2,08	0,87	-	-	_	400
64	46	0,5	0,56	0,22	0,66	0.79	400
70	-	0,28	-	0,1	_	-	856
-	42	0,17	0,17	0,14	0,28	0,28	1292
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	220
100	60	-	-	_	16,3	-	220
110	-	4,5	1,6	0,85	-	4,9	620
-	60	1,37	1,37	1,1	2,3	2,2	1070
-	56	0,1	0,7	0,44	0,5	0,82	2030
-	-		-	- 1	-	• _	336
93	65	-	-	-	7,9	-	336
95	_	2,4	1,1	0,6	-	2,7	760
-	53	0,9	1,2	0,6	2,7	1,6	1210
-	60	0,1	0,27	0,53	0,6	0,6	2170
35	27	-	-	-	-	-	100
53	29	-	-	2,6	6,5	-	250
55	37	-	-	0,66	0,57	- 1	554
-	-	1,32	-	-	0,57	-	604
4	-	0,75		-	0,32	-	988
28	-	-	- '	-	-	-	152
55	29	(-)	-	3,8	8,5	-	180
55	33	-	-	0,66	0,67	-	484
-	-	1,96	-	1	0,12	-	944
	-	0,77	-	-	1		

2. В целом распределение точек, соответствующех вэрывам с разными типами забойки, не обнаруживает определенной закономерности. Некоторое систематическое различие можно проследить при сопоставлении вэрывов массой 5 и 7 т; значения скоростей в одних и тех же точках наблюдений при вэрыве с комбинированной забойкой лежат выше, чем при вэрыве с обычной забойкой. Однако аналогичное сопоставление данных по 10-тояным вэрывам и вэрывам зарядов массой 85 и 100 т не обнаруживает превышения в скоростях, соответствующих вэрывам с бетонной забойкой.

Аналогичный результат следует и из сопоставления временных карактеристик: из табл. 32 видно, что продолжительность положительной фазы волны сжатия при вэрывах одинаковых зарядов с различными забойками остается примерно постоянной. Приведенные значения $I_{+}/Q^{1/3}$ лежат в пределах 10 - 35 мс/т^{1/3}, что удовлетворительно согласуется с аналогичными значениями этого же параметра при вэрывах у горизонтальной свободной поверхности.

Наконец, для определения влияния типа забойки на интенсивность волны скатия можно воспользоваться результатами киносьемки епицентральной зоны взрыва. Начальное движение поверхности в этой зоие, как известно, обусловлено действием волны скатия, отражающейся от свободной поверхности. На рис. 52 приведены значения начальных скоростей в различных точках свободной поверхности в зависимооти от приведенного расстояния, измеренные по кинокадрам. Из него видно, что все точки независимо от типа забойки группируются около некоторой единой зависимости.

На основании приведенных данных можно сдепать общий вывод: герметизация штольни с помощью бетонной забойки и исключение преждевременного выхода газов из полости взрыва практически не влияют на интенсивность излучаемой волны сжатия.

Осциплограммы окорости колебаний поверхности при вэрывах на склоне по овоему характеру такие же, как и при вэрывах на выброс. Из них видно, что после первого вступления, соответствующего объемной волне сжатия, наблюдаются сравнительно низкочастотные фазы колебаний, которые возбуждаются в процессе нарушения центральной ониметрии движения и формирования осесимметричного куполосбразного поднятия массива в эпицентральной зоне. Как было показано, при этом излучается волна разрежения и поперечная волна. Вблизи эти волны налагаютоя друг на друга и строгое выделение каждой из них затруднено. При вэрывах на склонах не ставилась задача об идентификации инзкочастотных колебаний. Здесь важно было проследить в целом влияние забойки на вторую стадию вэрыва, на которой излучаются низкочастотных колебаний в соответствующих точках, не заботясь о том, какой волне ети колебания принадлежат.

На рис. 112, в приведены значения полного вектора скорости низкочастотных колебаний в зависимости от приведенного расстояния. Прямыми линяями показаны зависимости скорости от расстояния в волне разрежения и в поперечной волне, построенные по данным взрывов вблизи горизонтальной свободной поверхности.

Из рис. 112, в видно, что точки лежат в основном вблизи прамой 1, соответствующей волие разрежения, хотя отдельные точки располагнотся ближе к прямой 2. Группирование точек около прамых означает, что интенсивность визкочастотных воли (поперечный и разрежения) при варывах на окловах и вблизи горизонталькой овободной поверхности прибписятельно одинакова.

Сопоставление данных в соответотвухщих точках, как внано из рно. 112, в, также не обнаружи-



Рис. 113. Завновмость периода низкочнототных колебаний от марсы заряда

наэт влияния типа забойки. Этот же вывод опедует вз сопсотевления низкочастотных колебаний по отдельным компонентам (см. тебл. 32). На рис, '113 приведены данные о периоде незкочастотных колебаний. Точками указаны периоды для взрывов зарядов массой 5, 7, 10, 83 и 100 т о различными типами забойки. Прямой линией показана зависимость периода от массы заряда ; ВВ, полученная при взрывах на выброс о применением обычной забойки. Из рисунки видно; что все точки удовлетоворительно согласуются между собой и лежат на прямой линии.

Таким образом, анализ параметрев сейомических воля позволяет оделать вывод о том, что тип забойки не вляяет заметным образом на интенсивность сейсмических колебания. При етом важно отме-THERE TTO STOLO BILLSHULS HE BRILLO KAK TO BOILNE CKATES, BOOMS HOLD чення которой относниельно невелико, тех и по переметрем волны разрежения и поперечной волны. Эти поспедние волны изпучаются на отадии куполообразного поднятия массива в отражают более длятельные процессы передачи енергии от продуктов варыва в среду. И тем не менее их интренсивность также не обнаружили зависимости от типа забойки. По-видимому, эти факты можно объщонить спедующим образом. Окончание излучения воле на отадии куполообразного поднатия определяется моментом разрушения породы. Песле того как порода в эпицентральной соне потеряла овязность, передача энергия в окружающий массив преклическа прекращается, котя эта порода к испытывает положительное ускорение под действием продуктов взрыва. В результате эффект выброса породы в олучае применения бетонной забойки увеличивается, а интенции случаемых при этом воли остаетоя неязменной. Этот вывод вмеет также положительное значение для практики взрывных работ: применение бетонной забойки в целях усиления эффекта выброса пород не певлечет за собой увеличения сейомобезопасных расстояний.

30-1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Роднонов В.Н. Моделирование взрыва на выброс при помощи пабораторной вакуумной установки. - В кн.: Взрывное дело, № 64/21. М., Недра, 1968, с. 24-42.

2. Артемьев М.Е.О связи нарушений изостатического равновесия с сейсмичностью. - В кн.: Экспериментальная сейсмологии. М., Наука, 1971, с. 322-334.

3. Авдеев Ф.А., Ручкин В.М. Строительотво Байназинской набросной плотины методом напривленного взрыва. - В кн.: Взрывное дело, № 69/26. М., Недра, 1970. с. 22-32.

4. Балоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. М., Госгеолтехиздат, 1962,

5. Буллен К.Е. Введение в теоретическую сейсмологию, М., Мир, 1966.

6. Вахрамеев Ю.С. Некоторые соотношения подобия для движения сыпучей уппотняющей среды. – Прикладная математика и механика, 1970, 34, № 5, с. 930-934.

7. Васкльев Ю.Ф. Экспериментальное взучение механизма процесса сдвига. -В кн.: Экспериментальная сейсмология. М., Наука, 1971, с. 360-387.

В. Введевская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории диспокации. М., Наука, 1969.

9. Викторов В.В., Степанов Р.Д. Моделирование действия взрыва сосредоточенных зарядов в однородных грунтах. - Инженерный сборник, т. 28. М., Госгортехнадат, 1960, с. 87-96.

10. Влияние гозосбразующих веществ в очаге влектровзрыва на движение слабосвязанного грунта /И.Л. Зельманса, О.С. Колков, А.М. Тихомиров, А.Ф. Шадукевич. – Докл. АН СССР, 1968, 178, № 1, с. 90-93.

11, Влияние теплофизических свойств среды в очаге электроворьва на параметры воронки выброса /И.Л. Зельманов, А.И. Канунов, В.Н. Куликов и др. – Прикладная механика и техническая физика, 1969, № 2, с. 73-76.

12. Гутенберг Б. Физика земных недр. М., Изд-во иностр. п-ры, 1963.

13. Геолого-геофизические исследования в VI рейое научно-исследовательского судна "Академик Курчатов" в Северной Атлантике /Г.Б. Удиндев, А.Ф. Берсенев, Е.В. Вержбицкий и др. – В кн.: Строение земной коры и верхней мантин морей и океанов. М., Наука, 1973. с. 3-28.

14. Докучаев М.М., Васильев Г.А., Дороничева Л.А. Справочник по буровзрывным работам на строительстве. М., Гоогортехнадат, 1962.

15. Докучаев М.М., Родионов В.Н., Ромашов А.Н. Взрыв на выброс. М., Изд-во АН СССР, 1963.

16. Донской М.Г., Давыдов С.А. Повышение эффективности взрывания на выброо при помощи коротких замедлений. – В кн.: Вэрывное дело, № 45/2. М., Госгортехиздат, 1960, с. 117-124.

Госгортехиздат, 1960, с. 117-124. 18. Демидюх Г.П. Управление действием вэрыва при горных работах. - В кн.: Научные основы технологии открытых горных работ. М., Наука, 1969, с. 43-54.

18. Заряды с воздушными полостями при взрывах на выброс / Н.В. Мельников, Л.Н. Марченко, Н.П. Сеннов и др. - В кн.: Взрывное дело, № 71/28,1972, с. 5-17.

19. Инженервые наблюдения механического сейсмического действия взрыва на р. Бурлыкия /В.В. Адушкии, А.Г. Фомичев, С.В. Кондратьев и др. - Гидротехническое строительство, 1977, № 5, с. 32-35.

· 238

20. Knox I.B., Terhune R.W. Calculation of explosion - produced craters higt explosive G. Leoph. Res. 1965. Vol. 70, #10, p. 2777-2793.

21. Кузнецов Н.М., Шведов К.К. Изентропическое расширение продуктов детонации гексоогена. - ФГВ, № 2, 1967, с. 203-211.

22. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела, Новосибирск, Нау ка, 1977.

23. Коротков П.Ф., Гужов Н.А. Расчет вэрыва на выброс в лучевом прибпожении – ПМТФ, № 6, 1975, с. 77-86.

24. Косыгин Ю.А. Техтоника. М., Недра, 1969.

25. Курбангалина Р.Х., Беляев А.Ф. Определение работоспособности ВВ в свяндовой бомбе. - В кн.: Физика вэрыва, № 5, ИХФ АН СССР, 1956, с. 35-54. 26. Кушнарев Д.М., Беликов М.П. Вэрывные работы в гидромелиоративном

в сельском строительстве. М., Стройнадат, 1972.

27. Кинематика развития вэрыва вблизи наклонной свободной поверхности / А.Н. Ромашов, В.В. Гарнов, И.Я. Иттер, С.А. Симоняи. Реферативная информация о передовом опыте. М., Изд. Минмонтажспецстрой, 1972; серия V.N. 5, с. 11-13

28. Лаврентьев М.А., Кузнепов В.М., Шер Е.Н. О направленном метавии групта с помощью взрывчатых веществ. Новосибирок, Изд-во СО АН СССР, 1961, с. 3-12.

29. Леонов Г.П. Историческая геология. М., изд. МГУ, 1956.

30. Любимова Е.А. Термяка Земли и Луны, М., Наука, 1968.

31. Лукк А.А. Затухание сейсмических воли в очаговой зоне глубоких Памиро-Інндукушских землетрясений. - В кн.: Сборнык експериментальной сейсмологии. М., Наука, 1971, с. 87-97.

32. Мелькиков Н.В., Марченко Л.Н. Энергия варыва и конструкция заряда. М., Недра, 1964.

33, Менард Г.У. Геология дна Тихого океана. М., Мир, 1966.

34. Механика подземного взрыва /В.В. Адушкин, В.Н. Кооткоченко, В.Н. Наколаевский, В.М. Цветков. – В кн.: Механика твердых деформируемых тел, т. 7. М., изд. ВИНИТИ, 1974, с. 87-175.

35. Механический эффект подземного взрыва /В.Н. Роднонов, В.В. Адушкия, В.Н. Костюченко и др. М., Недра, 1971.

36. Местное действие взрыва вблизи наклонной свободной поверхности/ А.Н. Ромашов, В.Ф. Евменов, И.Я. Иттер, С.А. Симонян.-Реферативная информация о передовом опыте. М., Изд. Минмонтажопецстрой. 1972, серия V.c. 15-18.

37. Мясников К.В., Прозоров Л.Е., Ситиков И.Е. Механическое действие одиночных и группового подземных ядерных варывов на выброс и исследование инженерно-технических свойотв вызмок етих вэрывов. - В кв.: Атомные вэрывы в мирных делях. М., Атомиздат, 1970, с. 52-74.

38. Опыт применения вэрывных технологий строительства ирригационных канапов в Туркменской ССР /Ю.П. Андреев, Л.И. Демищук, Г.И. Черный и др. – В кн.: Взрывные работы в грунтах. Киев. Наукова думка, 1975. с. 106-112.

ЗЭ. ОСНОВЫ динамики грунтов /А.А. Вовк, Г.И. Черный, А.Г. Смярнов, В.Г. Кровец. Киев, Наукова думка, 1968.

40. Образование сейсмических воли в грунте при взрыве вблизи свободной 40. Образование сейсмических воли в грунте при взрыве вблизи свободной поверхнооти /Б.В. 'Лебедев, А.А. Провалов. А.Н. Ромашов, В.И. Чубаров. - В кн.: Взрывное дело, № 64/21. М., Недра, 1968, с. 93-109.

41. О направленности броска породы при взрывах на оклонах "/А.Н. Рома-41. О направленности броска породы при взрывах на оклонах "/А.Н. Ромашов, В.Ф. Евменов, И.Я. Иттер, С.А. Симонян. - Раферативная информация о не-

редовом опыте. М., изд. Минмонтажспецотрой, 1973, серия V, с. 12-15. 42. Основные технические аспекты использования подземных ядерных взры-

30-2

вов в вародном хозяйстве /О.Л. Кедровский, И.Я. Иванов, К.В. Мясников к др. -В юк.: Атомпые взрывы в мирных пенях. М., Атомиздат, 1970, с. 5-51.

43. Покровский Г.И., Федоров И.С. Действие удара и взрыва в деформвруемых средах. М., Промстройнадат, 1957.

44. Покровский Г.И., Федоров И.С., Докучаев М.М. Теория и практика строительства плотии направленными вэрывами. М., изд. ГИЛСА, 1951.

45. Пейве А.В. Общая характеристика, клаосификация и пространственное распопожение глубинных разпомов. Главнейшие типы глубинных разпомов. – Изв. АН СССР, сер. гаол., 1956, № 1, с. 90-105.

46. Попе упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений /Л.М. Боламина, А.В. Введенская, Н.В. Гопубева и др. – Сейсмология, № 8. М., Наука, 1972.

47. Примена Е.А., Кучерявый Ю.Ф., Майнов В.И. Эффектныный способ снюжения сейсмического эффекта в блюжней зоне. – В кн.: Вэрывное дело, № 71/28. М., Недра, с. 181-184.

48. Применение вэрывных методов стреительства какалов в водонесьщенных грунтах. /Ю.П. Андреев, Д.В. Бигдаш, А.Г. Смирнов, Г.И. Черный. - В кн.: Взрывкые реботы в грунтах. Кнев, Нвукова думка, 1975, с. 113-120.

49. Подземяые адерные вэрывы /Б.И. Нифонтов, Д.Д. Протононов, И.Е. Ситкихов, А.В. Куликов. М., Атомиздат, 1965.

50. Родновов В.Н., Цветков В.М. Некоторые результаты наблюдений при подземных ядерных вэрывах - Атомная енергия, 1971, т. 30, вып. 1, с. 31-36,

51. Роднонов В.Н. К вопросу повышения вффективности вэрыва в твердой среде. М., взд. ИГД им. Скочинского, 1962.

52. Ромашов А.Н. К вопросу о действии вэрыва в твердой среде. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. физико-матем. наук. М., Институт химической физики АН СССР, 1959.

53. Ромашов А.Н., Симонов Н.Н. О мехенизме образования и подобии воронок при взрывах на выброс в грунтах. - В кн.: Варывное дело, № 64/21. М., Недра, 1968, с. 42-57.

54. Ромашов А.Н., Сухотин А.П., Симонан С.А. Влияние интервалов замедления на объем воронки при вэрьвах на выброс. – Реферативная информация о передовом опыте. М., над. Минмонтажспецстрой, 1972, серия V, № 6, с. 16-20.

55. Ромашов А.Н., Симонан С.А. О роли кинетической энергик и показателя прострепиваемости грунта при взрыве на выброс. – Реферативная информация о передовом опыте. М., изд. Минмонтажспецстрой, 1973, серия V. № 7, с. 18-21.

56. Ромашов А.Н., Евменов В.Ф., Поддубный В.А. Работа продуктов детонаций при вэрызе на выброс. – В кн.: Использование вэрыза в народном хозяйстве, ч. З. Киев, Наукова думка, 1970, с. 26-36.

57. Ромашов А.Н., Евмевов В.Ф. Работа продуктов детоналии при взрыве на выброс – ФГВ, 1970, № 4, с. 539-545.

58. Ромашов А.Н., Гарнов В.В. Взрывы в Медео. - Горный журнал, 1967, N 7, с. 44-47.

59. Ромашов А.Н., Гарнов В.В. Создание водоналорных плотин с помошью царывов. - Падротехническое строительство, 1971, № 5, с. 11-16.

60. Ромашов А.Н. О природе некоторых воли в грунте, возбуждаемых подземным варывом. - В кн.: Верывное депо, № 64/21. М., Недра, 1968, с. 158-191.

61. Ромашев А.Н. Особенности развития выброса породы при вэрывах на склотв. - В кн.: Ворывное дело, № 76/33. М., Недра, 1976. с. 85-98.

62. Рулев Б.Г. Динамические карактернотики сейсмических волн при подземных вэрьпах. В кн.: Вэрьпвое дело, № 64/21. М., Недра, 1968, с. 109-158.

63. Рупев Б.Г., Харки Д.А. О заправленном сейсмическом действия рассредоточенных одиночных зарядов. - В кн.: Верьвное депо, № 64/21, М., Недра, 1965, с. 211-231.

64. Рупев Б.Г. Очаг семлетрясений и вэрыва как пвойной излучатель сейсмических воли. - В кн.: Экспериментальная сейсмология. М., Наука, 1971, с. 65-75.

65. Роль забойки при вэрыве на выброс /А.Н. Романов, В.В. Гарнов, И.Я. Иттер, С.А. Симонян. – Реферативная информация о передовом опыте. М., изд. Минмонтажспецстрой, 1973, серия V, N 8, с. 12-16.

66. Распределение на местности грунта, выбрасываемого при подземных вэрывах. /В.П. Сахаров, В.И. Копесников-Свинарев, В.Н. Назаренко, В.И. Забидоров. – ДАН СССР, 1959, т. 124, № 2, с. 314-317.

67. Садовский М.А., Адушкин В.В., Роднонов В.Н. Моделирование крупных взрывов на выброс. - Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 6, с. 1253-1255,

68. Садовский М.А. Сейсмический эффект вэрыва. М., Гостоптехиздет, 1939.

69. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. М., Изд-во АН СССР, 1946, 29 с.

70. Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М., Изд-во технико-теорет. п-ры, 1955.

71. Спиридонов И.Г. Некоторые вопросы взрывания на выброс в грунтах.-В кн.: Взрывное дело, № 47/4. М., Госгортехиздат, 1961, с. 140-156.

72. Сейсмический эффект взрыва на выброс в нескальных связных грунтах/ Н.В. Кузымина, А.Н. Ромашов, Б.Г. Рулев к др. – Труды ИФЗ АН СССР, № 21 (188). М., Наука, с. 3-72.

74. Ушаков С.А., Красс М.С. Сила тяжести к вопросы механики кедр Земли. М., Недра, 1972.

75. Христофоров Б.Д., Ромашов А.Н. Определение параметров волны сжатия в скальном грунте. - ФГВ, 1967, № 1, с. 137-143.

76. Червиговский А.А. Внешняя баллистика и дробление породы при взрыве на выброс к сброс. – В кн.: Взрытное депо, № 69/26. М., Недра, 1970, с.66-78.

77. Шацукевич А.Ф., Колков О.С., Тихомиров А.М. Развитие котповой полости при взрыве в песчаном грунте. - ФГВ, 1967, № 4, с. 569-573.

78. Шамин В.М. К вопросу о сейсмическом действии вэрыва на подземные выработив. - Труды ИФЗ АН СССР, № 33 (200). М., Наука, 1963, с. 92-99.

79. Шемякин Е.И. О волнах напряжений в прочиных горных породах. - ПМТФ, 1963. № 5. с. 83-93.

2438

СОДЕРЖАНИЕ

	3
	- -
1.2. Преобразование энергии газообразных продуктов взрыва в енер-	э
гню движения окружающей среды	9
1.2.1. Постановка задачи и методика исследования	9
тия взрыва	20
1,2,3. Причины изменения к.п.д. на разных стадних развития взрыва	24
1.2.4. Особенности взрыва вблизи плоской свободной поверх-	20
	20
1,2.5. Возможности повышения видективности использования	30
энергии варыва	97
1.3. Механкам ооразования видимой воронки выпроса	37
грунта при взрывах на выброс	44
2. Закономерности развития взрыва вблизи наклонной овободной поверх-	
HOCTE	50
2.1. Краткий внализ состояния вопроса	50
2.2. Исследование взрывов при строительстве селезащитной плотины	
в Медео	52
2.2.1. Общая характеристика вэрывов	53
2.2.2. Результаты правобережного взрыва	55
2,2.3. Результаты левобережного взрыва	59
2.2.4. Обсуждение результатов	60
2.3. Байпазинский вэрыв	63
2.3.1. Общая характеристика взрыва	64
2.3.2. Движение поверхности склона	66
2.3.3. Механизм образования плотины.	66
2.3.4. Обсуждение результатов взрыва	68
Porta	70
	73
	75
	75
	82
	94
	94
	96
	98
	101
	103
2.6.6. Влияние нитервалов замедления на действие взрывов	
вблизи свободной поверхности	106
2.6.7. Влияние угла склона на объем навала породы.	111
З. Подобне при взрывах на выброс и сброс	118

2-2 '

3.1. Подобне взрывов на склонах	121
3.2. Подобие при взрыват на выблос в речитат	123
3.3. Подобие при ялерных варывах на виблосо	1.30
	1 26
2.5. Оподоони нарынов горизонтальных цилиндрических зарядов	100
5.5. Определение оптимальной глуонны заложения зарядов пря вэры-	
BAX HA BLODOC	144
4. Построение модели источника излучения сейсмических воли	156
4.1. Движение среды вблизи полости при взрыве у свободной поверх.	•
HOCTE	158
4.1.1. Движение в центральной зоне	159
4.1.2. Излучение волн	163
4.2. О природе основных воли, выделяемых на сейсмограммах подзем-	
ных варывов вблизи свободной поверхности	165
4.2.1. Движение поверхности земли в эпицентральной области .	165
4.2.2. Продольная волна сжатия	167
4.2.3. Волже разрожения	170
	174
425 O pomo Parag	176
	1.92
	178
	190
	190
4.4.2. Характерные черты волновой картины при замлетриса-	197
REST	
4.4.3. Оценка некоторых геофизических явлении на основе со-	202
ображений о новоя модели очагов землетрисении	202
4,4,4. О механизме, определяющем структуру сенсмически вк-	210
тивных зон на Земле,	221
4.5. Вопросы инженерной сейсмоногии	66+
4,5,1. Сейсмические наблюдения при правобережном взрыве в	100
Медер	
4,5,2. Оценка сейсмического воздействия крупных взрывов на	997
гидроссоружения в ближней зоне	201
4.5.3. Влияние типа забойки на параметры сейсмических волн	0.91
при взрывах на склоне	231
CHRON INTEDATVDAL	237

Александр Николаевич Ромашов Особенности действия крупных подземных взрывов

Редактор издательства Л.Ф. Тараканова Переплет художника А.Е. Чучканов Художественный редактор О.Н. Зайцева Технический редактор Л.С. Гладкова Корректор А.П. Стальнова ИБ № 949

Сдано в набор 25.	.07.80 Подписано в	печать 20.08.80	T - 14951
Формат 60.901/16	Бумага офсетная	Печать офсетная	Уч над. п 16,83
:Тираж 1250	Заказ Na 2436/6210	Цена 2р. 50 к.	Усл. печ. л. 15,25

Издательство "Недра", 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19 Производственно-издательский помбиват ВИНИТИ Люберцы, Октябрьский проспект, 403



2 р. 50 к.