

одной трети максимального значения. При дальнейшем движении происходит разуплотнение. Вблизи от взрыва разуплотнение существенно меньше, чем предшествующее уплотнение, поэтому после прохождения взрывной волны сохраняются остаточные деформации. С удалением от взрыва, т. е. с уменьшением нагрузки, величина разуплотнения приближается к величине уплотнения, а остаточные деформации стремятся к нулю.

Проведенные исследования взрывных волн подтверждают, что поведение грунтов при быстропротекающих волновых процессах определяется объемной вязкостью, проявляющейся в зависимости диаграмм объемного сжатия и разгрузки от скорости деформации, и пластическими свойствами, приводящими к необратимости деформаций. Эти свойства грунта учитываются вязкопластической моделью [2]. С уменьшением нагрузки остаточные деформации стремятся к нулю, но зависимость диаграмм сжатия и разгрузки от скорости деформации сохраняется. Эти свойства характеризуют вязкоупругую модель грунта. Размывание волны происходит как в вязкопластических, так и вязкоупругих средах, поскольку оно обусловлено вязкими свойствами.

*Институт геофизики
АН УССР, Киев*

*Поступила в редакцию
15/VII 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Ляхов. ПМТФ, 1968, 4.
2. Г. М. Ляхов. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М., «Недра», 1974.
3. Ю. И. Васильев, Л. А. Иванова, М. Н. Щербо. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1969, 1.
4. А. А. Вовк, А. Г. Смирнов, В. Г. Кравец. Динамика водонасыщенных грунтов. Киев, «Наукова думка», 1975.
5. Г. М. Ляхов, К. С. Султанов. ПМТФ, 1975, 6.

О ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВЗРЫВОМ НА ВЫБРОС В ПРОЦЕССЕ ЕГО РАЗВИТИЯ

П. Ф. Коротков, Д. А. Судаков

Использование эмпирических формул и применение расчетных методов для предсказания действия взрыва на выброс часто не может дать достаточную точность из-за сложности и неоднородности геологического строения массива. Получение подробной информации путем бурения скважин или сейсмическим зондированием связано с большими затратами материальных средств и времени. Полученные данные не дают точного представления о выбросе. Особенно трудно предсказать прорывы газов через образующиеся в поднимающемся куполе трещины, что сильно снижает эффективность взрыва. В то же время для каждого крупного взрыва желательно иметь достаточно точный расчет с тем, чтобы свести к минимуму доделочные работы. По этой причине может быть выгодно пойти на повышенный расход ВВ, если это поможет провести взрыв более точно.

Метод управления взрывом на выброс с помощью подрыва вспомогательного заряда предложен в работе [1]. Характерное время разви-

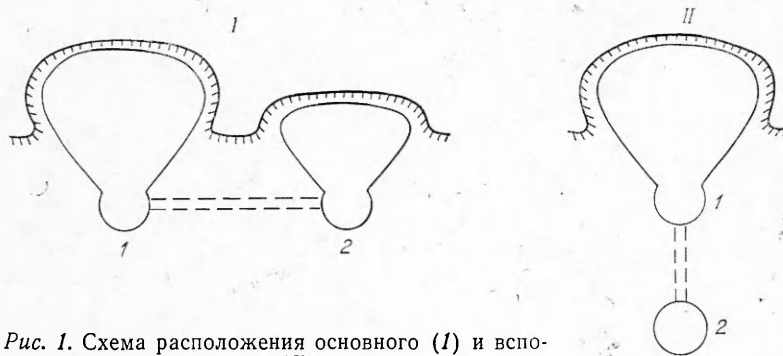


Рис. 1. Схема расположения основного (1) и вспомогательного (2) зарядов.

тия крупных взрывов достаточно велико, чтобы вмешаться в этот процесс. Например, при взрыве заряда в 1000 т тротила [2] энергия газообразных продуктов передается грунту за несколько секунд. За это время современные ЭВМ способны обработать достаточный объем информации, характеризующей развитие взрыва, и дать необходимые сведения для проведения дополнительного взрыва с целью коррекции движения массива. Эту информацию можно получить, например, наблюдением скорости подъема купола.

В работе принята следующая математическая модель взрыва на выброс. На заданной глубине в среде имеется сферическая полость, которая под действием давления содержащегося в ней газа начинает расширяться. Это основной взрыв. Через некоторый интервал времени с этой полостью соединяется вторая, заполненная газом (вспомогательный взрыв). Результирующее давление газа выравнивается и определяется из закона сохранения энергии. В дальнейшем происходит совместное развитие двух сообщающихся полостей под действием общего давления. Два варианта взаимодействия полостей показаны на рис. 1. В варианте I развиваются две воронки выброса, которые не взаимодействуют между собой. В варианте II образуется одна воронка. Основное внимание в работе уделено первому варианту. Управление эффективностью основного взрыва осуществляется изменением времени задержки вспомогательного взрыва.

Выброс рассчитывался в лучевом приближении. Предполагается, что среда движется в радиальном направлении, и учитываются касательные напряжения между соседними элементами среды. Этот метод применялся для расчета модельных и натуральных взрывов на выброс [3]. В настоящей работе использованы следующие значения параметров. Плотность среды $1,5 \text{ г/см}^3$, сцепление равно нулю (сыпучая среда), коэффициент трения 0,6, глубина взрыва 50 м, начальный радиус полости 19 м, энергия взрыва $E_0 = 4 \cdot 10^{12}$ Дж (1000 т ВВ). К моменту начала расчета, соответствующего началу стадии газового ускорения, в полости было оставлено 20% начальной энергии взрыва [4]. При расширении полости давление падает по адиабатической зависимости с показателем 1,4. Радиусы основной и вспомогательной полости, а также начальные давления в них принимались одинаковыми.

На рис. 2 показана зависимость давления от времени в полости основного заряда. При дополнительном взрыве давление скачком возрастает в момент его подключения, а затем также спадает. При более подробном учете движения газов в полостях (возмущения распространяются со скоростью звука) отмеченный скачок более сложен по структуре в течение времени порядка отношения длины штольни между зарядами к скорости звука. Это отношение невелико по сравнению с временем развития взрыва на выброс, так как длина штольни примерно

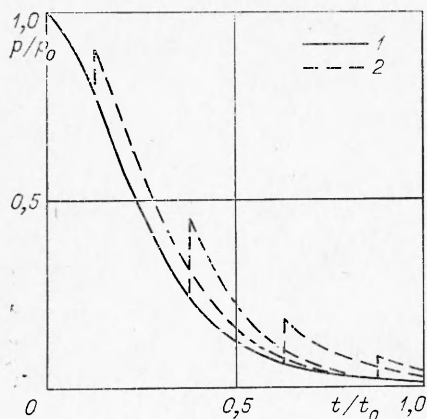


Рис. 2. Зависимость давления в полости от времени при разных временах задержки.

1 — одиночный взрыв; 2 — при дополнительном взрыве.

Из рисунка видно, что при малых τ увеличение объема выброшенного грунта из-за подключения дополнительного взрыва невелико. В этом случае первая полость расширилась еще мало и давление в ней близко к первоначальной величине и к давлению во второй полости, так что перетекание газов мало. Дополнительный взрыв также образует свою воронку выброса. При $\tau=0$ оба взрыва развиваются одинаково, и вспомогательный не оказывает влияния на основной, образуя свою такую же воронку. При больших временах задержки объем полости становится большим, воронка основного взрыва уже почти сформировалась, поэтому второй взрыв мало влияет на процесс выброса первого. Между предельными значениями задержки расположен максимум увеличения объема выброшенного грунта от основного заряда. Для рассмотренных значений энергии максимум получается при $\tau/t_0=0,25$. В данном случае взрывы разной энергии производятся на одной и той же глубине, и кроме основной воронки выброса развивается и вторая воронка, что служит причиной относительно малого изменения объема.

Таким образом, эффективность дополнительного взрыва невелика, однако этого от него и не требуется. Дополнительный взрыв применяется для достижения точности и получения расчетной величины выброшенного объема. Для такой цели выгодно подбирать параметры вблизи экстремума, так как при наличии ошибки во времени задержки достигается лучшая точность коррекции.

Из рис. 3 видно, что линии, соответствующие энергиям $0,9 E_0$ и $0,8 E_0$, пересекают прямую $V/V_0=1$ в двух точках, что дает два момента подрыва вспомогательного заряда. Эти точки пересечения для разных энергий приведены на рис. 4. Из полученных результатов следует, что если основной взрыв не достиг расчетного значения E_0 , то с помощью одного и того же вспомогательного заряда можно довести объем выброшенного грунта до расчетной величины. Однако при этом существует определенный диапазон непредвиденного уменьшения энергии основного взрыва, при котором возможна коррекция.

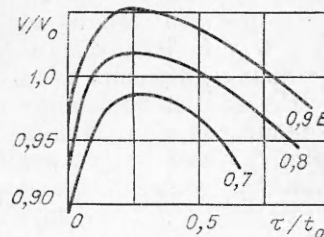


Рис. 3. Влияние времени задержки на объем выброшенного грунта.

равна заглублению, а скорость подъема свободной поверхности при выбросе составляет несколько десятков метров в секунду, что на порядок меньше скорости звука в продуктах взрыва. Другое явление, которое может привести к задержке выравнивания давления, — вязкость газов — не существенно при достаточно широкой штольне, которая обычно используется для закладки зарядов.

На рис. 3 приведена зависимость объема грунта V , выброшенного только основным взрывом, от времени задержки τ для различных значений энергии газа в полости при одной и той же глубине заложения заряда. Величина $V_0=1,7 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ равна объему выброшенного грунта при взрыве с энергией E_0 ; $t_0=2 \text{ с}$ — время расширения одиночной полости до атмосферного давления в ней.

Рис. 4. Зависимость времени задержки от энергии взрыва.

В рассмотренном случае по рис. 4 видно, что область коррекции заключена в пределах $0,74 E_0 < E < E_0$.

Рассмотрим один из возможных способов определения эффективной энергии E , которой соответствует развитие взрыва с предполагаемой энергией E_0 . Как уже отмечалось, из-за образования прорывов факелов газа и по другим причинам эффективное значение энергии взрыва может уменьшиться на заранее неопределенную величину. Необходимую информацию можно получить по скорости центральной части купола. На рис. 5 сплошными линиями показана зависимость этой величины от времени для основного взрыва, штриховыми линиями нанесена скорость после начала действия вспомогательного взрыва при больших временах задержки, пунктиром — при малых временах. Виден разный характер действия дополнительного взрыва. При малых временах скорость центральной части возрастает мало, а при больших — сильно, но конечный объем воронки в соответствии с рис. 3 оказывается одинаковым при показанных временах задержки, так как он определяется в основном скоростью боковой части купола.

По значению скорости в выбранный момент наблюдения можно определить эффективное значение энергии. Для этой цели удобно пользоваться данными расчетов в другом виде. На рис. 6 показана зависимость эффективной энергии основного взрыва от скорости в центре купола для трех моментов наблюдения. Для коррекции взрыва удобнее пользоваться малыми временами наблюдения. Они должны быть меньше времени, при котором достигаются максимумы на рис. 3. Времена же задержек целесообразнее брать больше этого времени.

Полученные результаты позволяют предложить конкретную схему управления взрывом на выброс. Для управления используются данные, представленные на рис. 4 и 6. Приведем конкретный пример расчета коррекции. Скорость центральной части купола будем определять в момент $t/t_0 = 0,2$. Пусть, например, она оказалась равной 6 м/с. По рис. 6 находим, что $E = 0,82 E_0$. Согласно рис. 4, при таком значении энергии основного взрыва расчетное значение объема выброшенного грунта будет получено при $\tau = 0,59 t_0$. Таким образом, в предлагаемой схеме управления нужно уметь определять скорость поднимающегося купола и

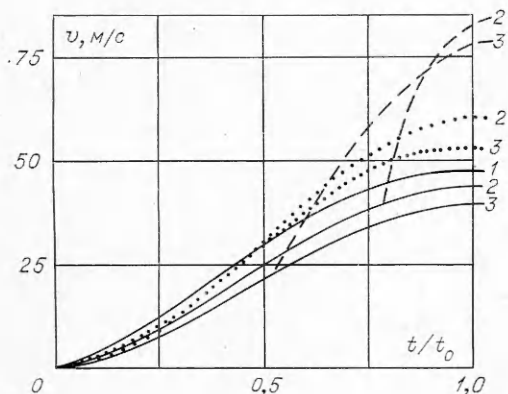
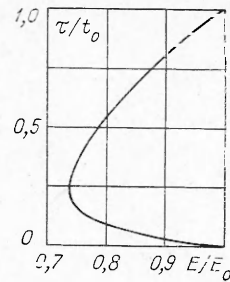


Рис. 5. Зависимость скорости купола от времени при энергии взрыва:
1 — E_0 ; 2 — $0,9 E_0$; 3 — $0,8 E_0$.



затем по заранее подготовленным данным вычислять необходимое время задержки для подрыва вспомогательного заряда. При математическом моделировании эти данные получают расчетом. Для управления достаточно иметь один расчетный график, который можно построить по рис. 4 и 6 путем исключения энергии. Пример такого построения показан на рис. 7. Линии начинаются с величин задержек, которые больше соответствующего времени наблюдения.

В заключение отметим работу [5], в которой экспери-

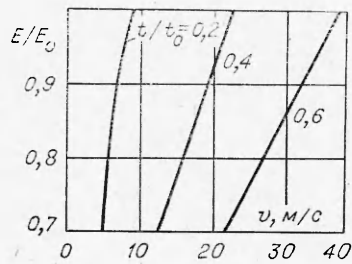


Рис. 6. Зависимость эффективной энергии основного взрыва от скорости в центре купола.

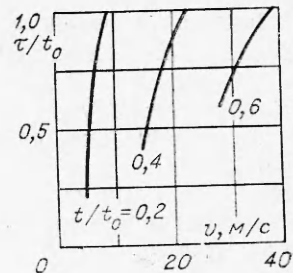


Рис. 7. Зависимость времени задержки от скорости купола.

ментально показано, что время задержки второго взрыва существенно влияет на объем выброшенного грунта. Взаимодействие зарядов в этой работе осуществлялось через раздробленную первым взрывом породу. Вопросы коррекции при этом рассмотрены не были.

Институт физики
Земли АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
28/VII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Садовский, В. Н. Родионов. Наука и жизнь, 1973, 11.
2. М. М. Докучаев, В. Н. Родионов, А. Н. Ромашов. Взрыв на выброс. М., Изд-во АН СССР, 1963.
3. Н. А. Гужов, П. Ф. Коротков. ПМТФ, 1975, 6.
4. В. Н. Родионов, В. В. Адушкин и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1973.
5. Влияние интервалов замедления на объем воронки при взрывах на выброс. Реферативная информация о передовом опыте. Вып. 6. ЦБНТИ, 1972.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛА В ИНТЕНСИВНЫХ ВОЛНАХ СЖАТИЯ

Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. Н. Дремин

С целью выяснения механизма деформирования хрупких материалов при ударном сжатии проведены измерения анизотропии напряжений в сжатом ударной волной стекле и откольной прочности стекла непосредственно после ударного сжатия. Амплитуда волны сжатия изменялась в диапазоне от 60 до 230 кбар. Результаты измерений показывают, что образующиеся при разрушении раздавливанием в волне сжатия частицы образца могут свободно скользить относительно друг друга (по крайней мере при разгрузке), но прочность образца в целом на разрыв остается довольно высокой. Это объясняется образованием расплавленных прослоек между частицами образца в процессе его деформирования.

Знание особенностей деформирования хрупких материалов при ударном сжатии необходимо для анализа процессов, протекающих при сильных подземных взрывах, а также в условиях взрывной или лазерной обработки материалов. Известные работы [1—3] по исследованию ударной сжимаемости кварца и керамических материалов не дают достаточно надежных данных для однозначных выводов о механизме деформирования хрупких материалов в ударной волне, но в ряде случа-