

Подведем итоги проведенного исследования.

1. Получены аналитические формулы, определяющие поле массовых скоростей, дающие возможность анализировать пространственно-временные закономерности в волновой картине при изменении геометрических характеристик взрыва.

2. Сравнение расчетной схемы с экспериментальными результатами в мраморе показывает, что эпюры массовых скоростей геометрически подобны на конических поверхностях с вершиной в точке инициирования заряда. Временные характеристики эпюр определяются в основном геометрическими факторами и отношением скорости продольных волн к скорости детонации ВВ.

*Институт физики Земли
АН СССР, Москва*

*Поступила в редакцию
18/1 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. H. L. Selberg. Arkiv für Fysik, 1952, 5, 7.
2. I. Hawkes. A study of stress Waves In Rock and the blasting action of an explosive charge, Colliery engineering, № 425, 1959.
3. В. А. Боровиков, И. Ф. Ваягин.— В сб.: Взрывное дело, № 76/33. М., «Недра», 1976.
4. А. Н. Ханукаев, В. П. Белецкий. ФТПРПИ, 1974, 2.
5. М. М. Павлов, Б. Д. Христофоров.— В сб.: Взрывное дело, № 76/33. М., «Недра», 1976.
6. М. М. Павлов, Д. А. Судаков.— В сб.: «Взрывное дело», № 76/33. М., «Недра», 1976.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В ГРУНТАХ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

*Н. Я. Барлас, И. И. Денисюк, В. Г. Кравец,
Г. М. Ляхов, В. А. Плаксий*

Анализ изменения напряжений при распространении взрывных волн, а также сжимаемости образцов при разных скоростях деформирования показывает, что поведение грунта при быстропотекающих динамических процессах определяется вязкими и пластическими свойствами. В соответствии с этими данными предложена модель грунта, учитывающая объемную вязкость и необратимость деформаций, а также найдены значения коэффициента вязкости [1, 2]. Опытами [3] показано, что вязкие свойства грунтов проявляются, начиная с малых нагрузок (доли атмосферы).

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований цилиндрических взрывных волн, включавших одновременное определение всех главных компонентов напряжений $\sigma_i(t)$ и деформации $\varepsilon_i(t)$. Исследован процесс деформирования грунта во времени, закономерности угасания напряжения и деформации с удалением от взрыва.

Методика экспериментальных исследований

Параметры взрывных волн определялись в насыпном супесчаном грунте средней крупности с плотностью скелета $\gamma_0 = (1,44-1,50) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ и влажностью $W = 8-17\%$. Грунт укладывался в котлован глубиной и длиной по 1,8 м и шириной 1,5 м, открытый в плотном

суглинке. Для создания одинаковых условий перед каждым опытом котлован очищался от грунта и заполнялся вновь.

Главные компоненты напряжений — радиальная $\sigma_r(t)$, тангенциальная $\sigma_\alpha(t)$ и осевая $\sigma_z(t)$ — измерялись высокочастотными тензотрическими датчиками, показания которых после усиления записывались шлейфовыми осциллографами.

Главные компоненты деформаций — радиальная $\epsilon_r(t)$ и тангенциальная $\epsilon_\alpha(t)$ — записывались датчиками (разработаны Г. М. Ляховым и В. И. Салицкой). Последние фиксировали смещения двух легких пластинок, расположенных в грунте на расстоянии 5 см друг от друга. Одна из пластинок соединялась с поршнем, который перемещался внутри цилиндра, соединенного с другой пластинкой. Диаметр цилиндра примерно в 8 раз меньше диаметра пластинок. Сопrotивление поршня смещению пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением сжатию грунта между пластинками. Взаимное смещение пластинок фиксировалось с помощью проволочных тензорезисторов, показания которых записывались на тех же осциллографах, что и напряжение. Датчики деформаций были двусторонними, т. е. могли записывать как сближение, так и удаление пластинок друг от друга.

В опытах измерялись деформации объема среды высотой 5 см. Волны создавались при взрыве цилиндрического заряда ВВ длиной 1,5 м, составленного из нитей детонационного шнура (ДШ). Применялись заряды из двадцати нитей, что соответствует погонной массе $Q=0,24$ кг/м. Заряд устанавливался вертикально в пробуренную скважину на расстоянии 0,5 м от стенки длиной 1,5 м. Иницирование проводилось из верхней точки.

Датчики помещались на глубине середины заряда (0,75 м), на расстояниях от оси заряда 0,48, 0,62, 0,75 и 0,88 м в сторону наиболее удаленной стенки. В каждой точке ставились три датчика напряжения и два — деформации. Датчики напряжения размещались, кроме того, на удалении 0,35 м.

Вследствие конечной длины заряда взрывная волна является цилиндрической только в некоторой области, ограниченной волной разрежения, распространяющейся от слоев, лежащих выше и ниже торца заряда. Для определения границы этой области измерялись напряжения на уровне нижнего торца заряда, выше и ниже его на 0,25 м. Датчики ставились на тех же расстояниях от оси заряда, что и основные.

Результаты опытов и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости напряжения от времени на расстоянии от оси заряда 0,75. На рис. 2 даны зависимости деформации от времени на том же расстоянии. Линии 1—4 на рис. 1 относятся к радиальному σ_r , осевому σ_z , тангенциальному σ_α и среднему нормальному ($\sigma = (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\alpha)/3$) напряжениям соответственно; линии 1—3 на рис. 2 — к компонентам ϵ_r , ϵ_α и к объемной деформации $\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_\alpha$. Знаки ϵ_r и ϵ_α различны, так как по радиальному направлению происходит сжатие, а по окружному — расширение грунта.

Из графиков на рис. 1 следует, что впереди движется предвестник, величина скачка на фронте которого на всех исследованных расстояниях практически равна нулю. За фронтом предвестника происходит возрастание напряжения. На расстояниях 0,48 и 0,62 м имеется участок быстрого нарастания напряжения (близкого к скачку), за которым происходит дальнейшее более медленное нарастание до максимального значения. На больших расстояниях напряжение до максимума увеличивается более медленно. Максимумы всех трех компонентов достигаются практически одновременно. Коэффициенты бокового давления

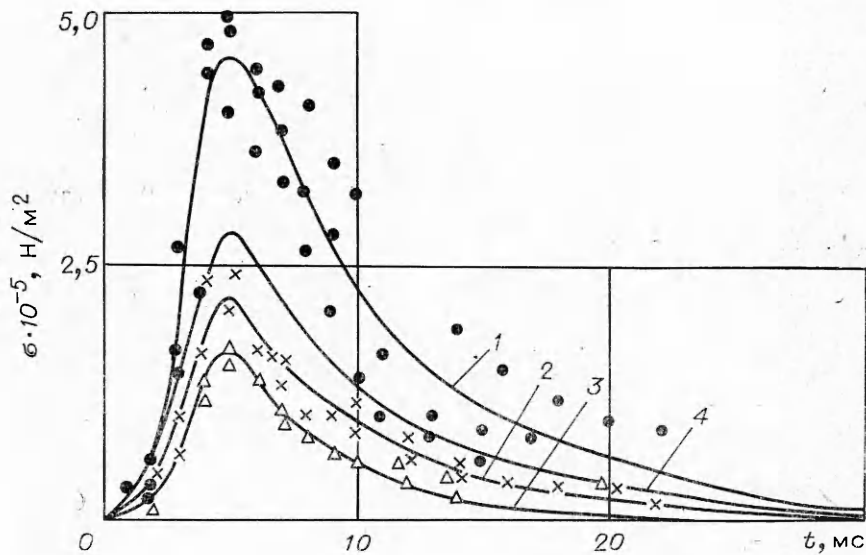


Рис. 1.

$\kappa_z = \sigma_z(t)/\sigma_r(t)$ и $\kappa_\alpha = \sigma_\alpha(t)/\sigma_r(t)$ на всех расстояниях r лежат в пределах $0,40 < \kappa_z < 0,55$ и $0,25 < \kappa_\alpha < 0,4$ соответственно. Изменение коэффициентов связано, в первую очередь, с разбросом экспериментальных значений. Возрастание κ_i с увеличением σ выражено слабо. В рассматриваемом интервале напряжений коэффициенты κ_i можно считать приближенно постоянными при любом изменении напряжения в частицах среды.

Во всех экспериментах наблюдается значительный разброс в значениях компонентов напряжения и деформации, достигающий 30%. Такой разброс характерен для параметров взрывных волн в грунтах, что ранее отмечалось в [2] и других работах. Из сопоставления результатов экспериментов следует, что деформации за фронтом волны в частицах грунта нарастают медленнее, чем напряжения. На расстояниях 0,48 и 0,62 м деформация $\varepsilon_r(t)$, как и напряжение, имеет участок быстрого нарастания, перед и за которым она увеличивается более плавно. Деформация $\varepsilon_\alpha(t)$ меняется непрерывно и существенно менее интенсивно, чем $\varepsilon_r(t)$.

В табл. 1 приведены значения времени нарастания до максимума напряжения и деформации на исследованных расстояниях от оси заряда.

Максимумы ε_r , ε_α и ε достигаются в существенно различные моменты времени. После достижения максимума ε_r компонент ε_α продолжает нарастать. Это приводит к убыванию со временем объемной деформации. После достижения максимальных значений ε_r и ε_α убывают незначительно. Остаточная объемная деформация поэтому меняется также мало.

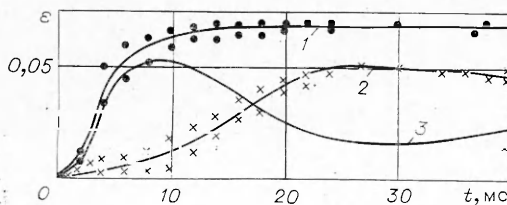


Рис. 2.

Таблица 1

$r, \text{ м}$	$t_{\text{max}}(\text{мс})$ для величин			
	σ_r	ε_r	ε_α	ε
0,35	1	—	—	—
0,48	3	8	17	6
0,62	4	15	20	8
0,75	5	20	26	9
0,88	8	23	32	15

Графики зависимости скорости объемной деформации от времени $\dot{\epsilon}(t)$ даны на рис. 3. Кривые 1—4 относятся к r , равным 0,48, 0,62, 0,75, 0,88 м соответственно. На всех расстояниях величина $\dot{\epsilon}(t)$ знакопеременна. По абсолютной величине максимальные (положительные) значения существенно больше, чем минимальные (отрицательные). На расстояниях 0,48 и 0,62 м в моменты времени, когда параметры σ_t и ϵ_r меняются скачком, $\dot{\epsilon}(t) \rightarrow \infty$. С увеличением расстояния максимальные и минимальные значения убывают по абсолютной величине, а время их существования увеличивается.

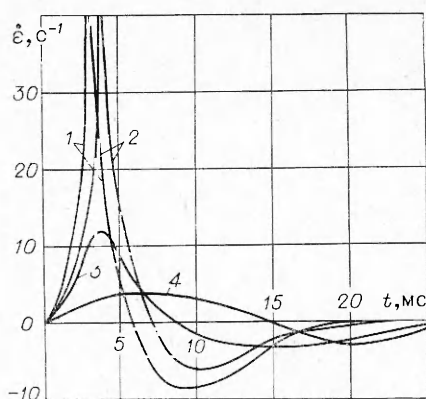


Рис. 3.

Тангенциальная деформация $\epsilon_\alpha(t)$ связана со смещением грунта $S(t)$:

$$\epsilon_\alpha(t) = S(t)/r.$$

Учитывая, что максимальные значения ϵ_α на расстояниях 0,48, 0,62, 0,75 и 0,88 м равны 0,10, 0,063, 0,05, 0,03, соответствующие значения максимального смещения грунта составляют 0,048, 0,039, 0,037 и 0,029 м. Дифференцируя последнее уравнение по времени, получим зависимость скорости частиц грунта от времени

$$u(t) = \dot{\epsilon}_\alpha(t) \cdot r.$$

Результаты вычислений приведены в табл. 2. Максимальное значение скорости достигается в период уменьшения напряжения, примерно одновременно с максимумом объемной деформации. С удалением от заряда максимальное значение скорости убывает, а время достижения увеличивается.

Одновременно увеличивается и общая длительность существования скорости. Время в табл. 2 отсчитывается от момента, когда на данном расстоянии скорость частиц составляет 0,03—0,05 от максимального значения.

Введем два относительных расстояния: $\bar{R} = r/r_0$ и $R^0 = r\sqrt{Q}$, $\text{м}^{3/2} \cdot \text{кг}^{1/2}$, где r_0 — радиус. В работе [4] при взрывах в суглинистом грунте цилиндрических зарядов длиной 2 м при $Q = 1 \text{ кг/м}$ на расстояниях R , равных 50, 75, 100 и 125, получены максимальные значения скорости частиц 11,4, 7,6, 3,8 и 3,3 м/с соответственно. Плотность скелета $\gamma_0 = 1,47 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, влажность $W = 29\%$. В исследованных супес-

Т а б л и ц а 2

r, м	u (м/с) при t (мс)									
	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
0,48	1,5	4,2	3,8	3,2	2,3	1,5	0,6	0	0	0
0,62	0,5	0,6	1,5	3,7	3,4	2,7	1,8	0,5	0	0
0,75	0,3	0,5	0,6	1,1	1,9	2,2	1,9	1,3	0,7	0,3
0,88	0,2	0,3	0,5	0,8	1,3	1,7	1,9	1,7	1,0	0,5

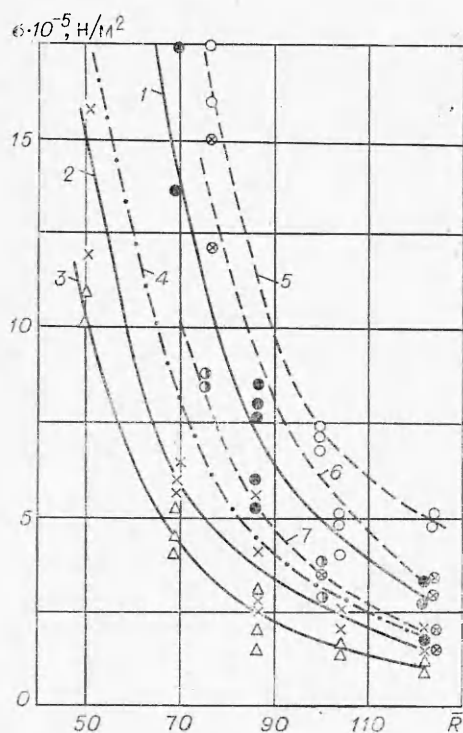


Рис. 4.

Определить по осциллограммам скорость распространения фронта взрывной волны (предвестника) трудно, так как величина скачка напряжения и других параметров на предвестнике практически равна нулю. Скорость распространения максимума напряжения на исследованных расстояниях убывает от 75 до 55 м/с.

Максимальные и остаточные значения объемной деформации грунта на расстояниях 0,48, 0,62, 0,75 и 0,88 м равны 0,14, 0,08, 0,05, 0,035 и 0,09, 0,04, 0,022, 0,01 соответственно. С удалением от взрыва отношение остаточных деформаций к максимальным убывает, свойства грунта приближаются к свойствам вязкоупругой среды, в которой вязкие свойства сохраняются, однако после разгрузки плотность среды приближается к начальной.

Объемная деформация ϵ связана с начальной (γ_0) и текущей (γ) плотностью скелета грунта соотношением

$$\gamma = (1 + \epsilon) \gamma_0.$$

В исследованном грунте среднее значение $\gamma_0 = 1,47 \cdot 10^3$ кг/м³. Отсюда для уплотнения взрывом грунта на расстояниях 0,48, 0,62, 0,75 и 0,88 м $\gamma = 1,60, 1,53, 1,51, 1,49 \cdot 10^3$ кг/м³.

Принимая, что границе уплотненной зоны соответствует остаточная деформация $\epsilon = 0,01$, найдем, что ее радиус $R_\epsilon^0 = 1,5m^{3/2} \cdot \text{кг}^{1/2}$. Увеличение массы заряда ВВ при тех же значениях максимального напряжения влечет за собой рост времени действия волны [2]. Вследствие этого деформации также возрастают, что должно привести к увеличению R_ϵ^0 . Этот вывод следует также из расчетов распространения волн, основанных на применении модели вязкопластической среды [5].

Перейдем к анализу результатов исследования краевого эффекта, связанного с конечной длиной цилиндрического заряда. На рис. 5

чаных грунтах (см. табл. 2) максимальная скорость имеет несколько меньшие значения: $u_{\text{max}} = 4,2, 3,7, 2,2$ и $1,9$ м/с при $\bar{R} = 69, 88, 107$ и 126 .

Рассмотрим значения максимальных напряжений на разных расстояниях от оси заряда. На рис. 4 линии 1—4 относятся к $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\alpha$ и σ соответственно. Для сопоставления на рис. 4, 5—7 приведены величины σ_r, σ_z и σ_α , полученные при взрывах цилиндрических зарядов в суглинистом грунте [4]. Общий ход кривых в суглинистом и исследованном супесчаном грунтах одинаков. Превышение напряжений (как и скорости частиц) в суглинистом грунте связано с большими значениями его плотности и влажности.

Зависимость максимальных значений радиального напряжения от расстояния приближенно можно представить в виде

$$\sigma_r = K(\sqrt[3]{Q}/r)^\mu, \text{ Н/м}^2,$$

где $K = 15 \cdot 10^5$; $\mu = 2,4$.

показано радиальное напряжение σ_r , измеренное при $r=0,62$ м и установке датчиков на 0,25 м выше нижнего торца заряда (1), на уровне торца (2) и на 0,25 м ниже торца (3). Линии 1 и 3 построены по результатам одного опыта. На том же расстоянии, но на уровне середины заряда максимальные значения σ_r лежат в интервале $(5,2-8,4) \times 10^5$ Н/м² (см. рис. 4), а среднее значение времени нарастания напряжения до максимума равно 4 мс. Влияние края заряда приводит

$6 \cdot 10^{-5}$ Н/м²



Рис. 5.

Диаграммы объемного сжатия и разгрузки грунта на разных расстояниях от взрыва

На рис. 6 приведена зависимость среднего нормального напряжения от объемной деформации $\sigma(\epsilon)$, построенная в соответствии со значениями $\sigma(t)$ и $\epsilon(t)$. Линии 1—4 относятся к расстояниям, равным 0,88, 0,75, 0,62 и 0,48 м соответственно. Из сопоставления кривых следует, что на каждом расстоянии имеется своя диаграмма сжатия и разгрузки грунта. Линии 3 и 4 включают участки быстрого (близкого к скачку) изменения σ и ϵ . На других расстояниях графики $\sigma(\epsilon)$ при нарастании напряжения имеют меньший наклон к оси деформаций, что соответствует меньшим значениям скорости деформации. Предельная динамическая диаграмма $\sigma(\epsilon)$ при $\epsilon \rightarrow \infty$ определяет изменение параметров только на скачке, каждому конечному значению ϵ соответствует своя диаграмма сжатия.

Объемная деформация достигает максимума не при максимальном напряжении, а в период его убывания, как это отмечалось ранее [1—3]. С удалением от места взрыва различие в значениях максимальной деформации и деформации при максимальном напряжении убывает, что связано с уменьшением $\dot{\epsilon}$ и приближением диаграммы сжатия к статической ($\dot{\epsilon} \rightarrow 0$).

Опыты показывают, что деформация грунта начинается с его уплотнения при относительно малых смещениях. Максимум плотности достигается при смещениях, примерно равных

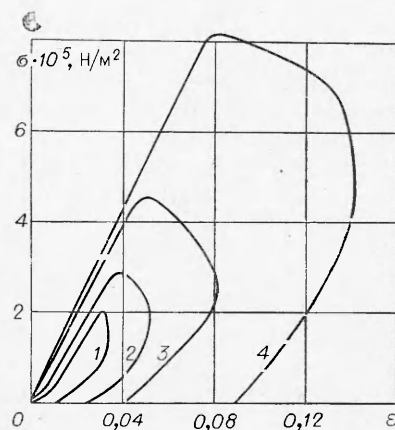


Рис. 6.

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-