

ПОДОБИЕ ВОЛН СЖАТИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ В ГРУНТАХ

Б. Г. Рулев

(Москва)

1. Вопросы подобия движения грунта при взрывах лежат в основе всех практических расчетов, как выброса грунта, так и сейсмических колебаний. Они находят отражение в формулах расчета веса зарядов, предназначенных для выброса породы и расчета сейсмозрывобезопасных зон [1-3]. Последнее требует знания соотношений между весом заряда, глубиной его заложения, расстояниями от источника и параметрами колебаний, возбуждаемых в грунте при взрывах.

Это влечет за собой необходимость изучения таких вопросов, как природа и свойства сейсмических волн при взрывах и их формирование вблизи источника. Многочисленными опытами (измерение выброса породы, определение поля скоростей и др.) установлено, что при этом соблюдается, так называемое, «геометрическое подобие» элементов движения среды. Термин не совсем удачный, так как при этом моделируются кинематические и динамические параметры.

Такое моделирование удовлетворяет критерию подобия Коши $\rho u^2/E = \text{const}$, полученному при действии в системе упругих сил, когда деформация происходит в пределах начального линейного участка кривой давление-сжимаемость. При этом в подобных системах параметры движения среды связаны соотношениями [4, 5]: $r_2 = \alpha r_1$ — линейные размеры, $t_2 = \alpha t_1$ — время, $u_2 = u_1$ — скорость, $\sigma_2 = \sigma_1$ — напряжение (давление), $\rho_2 = \rho_1$ — плотность, $\mathcal{E}_2 = \alpha^3 \mathcal{E}_1$ — энергия и т. д. Здесь α — линейный масштаб.

Исследования, подтверждающие геометрическое подобие движения грунта при взрывах, в подавляющем большинстве производились при деформациях, выходящих за предел упругости, когда в среде происходят необратимые процессы. Такое подобие волн сжатия может происходить в средах, модель которых содержит только параметры, имеющие размерность давления и плотности. В такой модели напряжения не зависят от скорости деформирования [6]. В этом случае масштабные соотношения между параметрами волны сжатия остаются такими же, как при подобии упругих систем. Это следствие того, что зависимость «давление-плотность» (характеристика состояния среды) не зависит от масштаба взрыва.

Можно предположить, что при определенных условиях, на процессы, протекающие в грунтах при взрыве, может оказать существенное влияние другая сила — сила тяжести. При этом параметры волн должны удовлетворять критерию подобия Фруда $u^2/gl = \text{const}$ и находиться в следующих соотношениях: $r_2 = \alpha r_1$ — линейные размеры, $t_2 = \alpha^{1/2} t_1$ — время, $u_2 = \alpha^{1/2} u_1$ — скорость, $\mathcal{E}_2 = \alpha^4 \mathcal{E}_1$ — энергия и т. д.

Примененный здесь метод доказательства подобия протекания процессов предполагает, что среда подвержена действию только одной силы. Из-за невозможности моделирования свойств среды подобие будет определяться условием тождественности только одного критерия подобия и следовательно будут определены условия и пределы преимущественного влияния какого-нибудь одного рода сил.

При сравнении параметров движения среды за основу взят не линейный размер, а вес заряда C . Предполагая, что энергия движения грунта пропорциональна энергии взрыва, а следовательно, и весу заряда, и сравнивая параметры всех взрывов с параметрами взрыва определенной величины заряда ($C = 1$ кг), находим:

при геометрическом моделировании

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{r_2^3}{r_1^3} = \alpha^3 \quad \text{или} \quad \alpha = C^{1/3}$$

при моделировании по Фруду

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{r_2^4}{r_1^4} \quad \text{или} \quad \alpha = C^{1/4}$$

2. Измерения параметров сейсмических волн возбуждаемых взрывом производились на ряде площадок, различных по геологическому строению. В данной работе рассмотрены взрывы в достаточно однотипных грунтах.

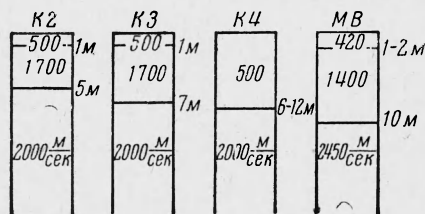
Площадки К2, К3, К4 (схематическое строение которых показано на фиг. 1), расположенные в Южном Казахстане (район ст. Арысь), представляют собой мощный слой синих глин со скоростями распространения продольных волн порядка 2000 м/сек и плотностью $\rho = 2$ г/см³. Сверху синие глины прикрыты небольшим слоем буро-зеленых глин ($V_p = 1700$ м/сек) и лёссовидным суглинком ($V_p = 500$ м/сек). Лёссовидный суглинок, вследствие сильного отличия своих свойств (большая пористость, малая скорость продольных волн) на площадке К4, где его мощность довольно значительна, внес некоторые искажения в параметры сейсмических волн.

Характерной особенностью площадки МВ, расположенной в Ставропольском крае, является наличие водоносного слоя мощностью до 10 м. Этот слой также явился причиной некоторых отклонений от общих закономерностей.

Измерения сейсмических волн производились на продольных профилях с переменным (увеличивающимся с расстоянием) шагом между приборами. Длина профилей при разномасштабных взрывах изменялась, примерно соответствуя геометрическому подобию. Приборы устанавливались на глубине 0.5 м в ямки, открытые по размерам датчиков, и затем плотно утрамбовывались. На больших расстояниях, где ускорения были незначительны, сейсмографы устанавливались (на полуметровой глубине) на утрамбованный грунт.

Измерение сейсмических колебаний производилось сейсмоприемниками ВВП [7] с параметрами: чувствительность $S_b = 1 \text{ мв} \cdot \text{сек} \cdot \text{см}^{-1}$; внутреннее сопротивление $R_s = 50 \text{ ом}$; период маятника $T_1 = 1.6 \text{ сек}$, приведенная длина маятника $l_0 = 65 \text{ см}$, затухание маятника равно 0.7 от критического и сейсмоприемниками ВЭГИК [8] с параметрами: $S_b = 200 \text{ мв} \cdot \text{сек} \cdot \text{см}^{-1}$, $R_s = 50 \text{ ом}$, $T_1 = 1.1 \text{ сек}$, $l_0 = 9.5 \text{ см}$,

затухание маятника равно 0.7 от критического. Регистрация производилась на осциллографы ПОБ-12 с гальванометрами ГВ-III, параметры которых: собственная частота 5 герц, внутреннее сопротивление 130 ом, критическое сопротивление 5000 ом, чувствительность 25000 мм/ма. Канал в целом дает запись смещений с постоянным увеличением в диапазоне частот от 2 до 100 герц. Эта аппаратура обеспечивает регистрацию колебаний с амплитудами от 3 микрон до 300 мм.



Фиг. 1

фиг. 2. (Взрыв в глине, $C = 10^3 \text{ кг}$, $h = 5 \text{ м}$.) На записи можно выделить три основные волны, распространяющиеся от места взрыва. Прямая продольная волна (фаза Р) наблюдается в первом вступлении на вертикальной составляющей. Вблизи очага взрыва, где в этой волне последующая фаза разрежения мала по сравнению с начальной фазой сжатия, она называется волной сжатия. На этих расстояниях волна сжатия несет максимум энергии. На более далеких расстояниях максимальными по интенсивности становятся поверхностные волны. Одна из них — волна R (на фиг. 2 отмечены ее фазы $R_1, R_2, R_3, \dots$ на вертикальной составляющей) — представляет собой поверхностную волну релеевского типа. Движение частицы при прохождении этой волны эллиптическое, против часовой стрелки с примерно равным соотношением между вертикальной и горизонтальной составляющей. Вторая волна N наблюдается в первых вступлении (фазы $N_0, N_1, N_2, \dots$ на горизонтальной составляющей). Движение частицы при ее прохождении эллиптическое (по часовой стрелке), более интенсивное по горизонтальной составляющей.

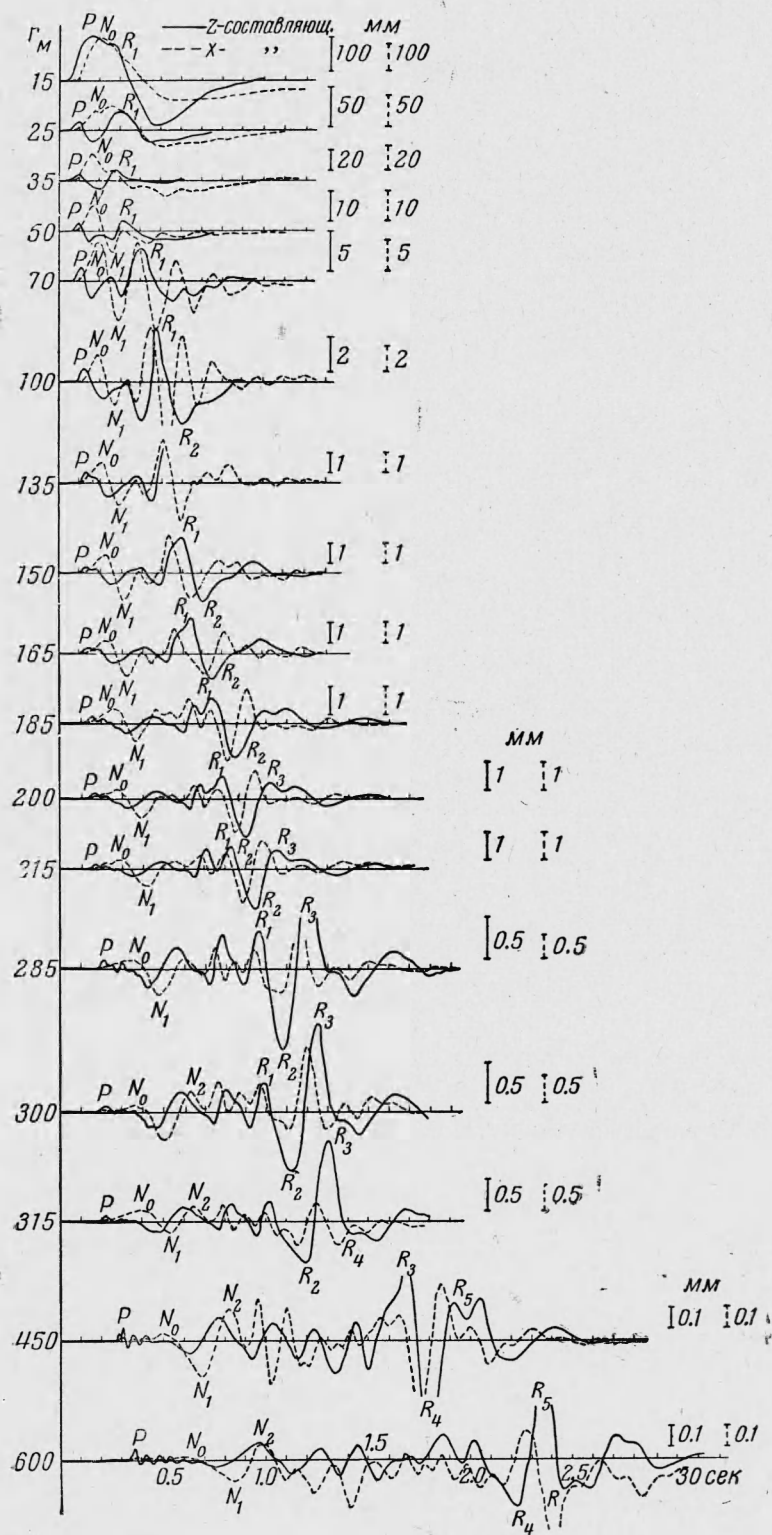
В районе ст. Арысь, кроме перечисленных выше, была произведена серия однотонных взрывов в двадцатипятиметровом слое лёссовидного суглинка. Запись колебаний при одном из этих взрывов приведена на фиг. 3 ($C = 10^3 \text{ кг}$, $h = 5 \text{ м}$). Из сравнения сейсмограмм при взрывах в глине и лёссе видно, что в лёссовидных суглинках наблюдаются только длиннопериодные поверхностные волны R и N, а волна сжатия вследствие большой пористости и сжимаемости лёсса почти целиком поглощается вблизи очага. Качественный анализ сейсмограмм и сравнение записей в плотных пористых грунтах показывает, что объемные волны не являются причиной образования поверхностных волн. Поверхностные волны образуются непосредственно в эпицентре (их первые фазы прослеживаются до воронки взрыва) вследствие относительно медленного расширения среды под действием газообразных продуктов взрыва, в то время как волна сжатия образуется от внезапно приложенного давления на поверхность камеры.

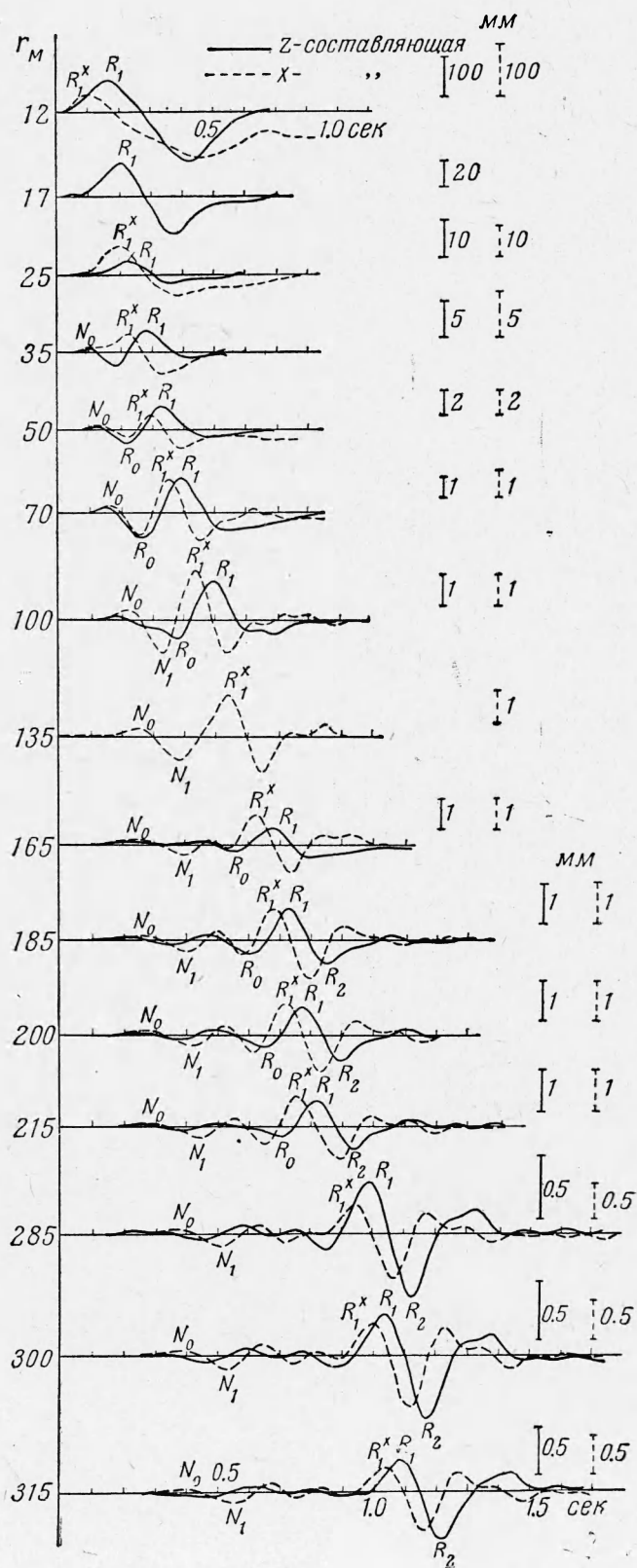
Можно указать на аналогичные процессы, происходящие при взрывах в воде, когда образуется ударная волна и движение воды вследствие расширения газового пузыря [9].

Это, очевидно, связано с такими свойствами взрывчатых веществ, как фугасное действие и бризантность. Бризантное действие связано с головной частью импульса, пропорционально максимальному давлению и, кроме того, зависит от свойств среды, на которую действует взрыв, т. е. оно связано с энергией, переносимой на фронте волны. От этих же параметров в основном зависит и волна сжатия. Фугасное действие взрыва связано с полным импульсом, при этом в движение вовлекаются массы грунта, находящиеся на сравнительно значительном расстоянии от заряда.

При близко расположенной дневной поверхности происходит выброс породы или подъем грунта (купол) при более глубоких заглублениях заряда. Этот процесс и является источником образования поверхностных волн.

Фиг. 2

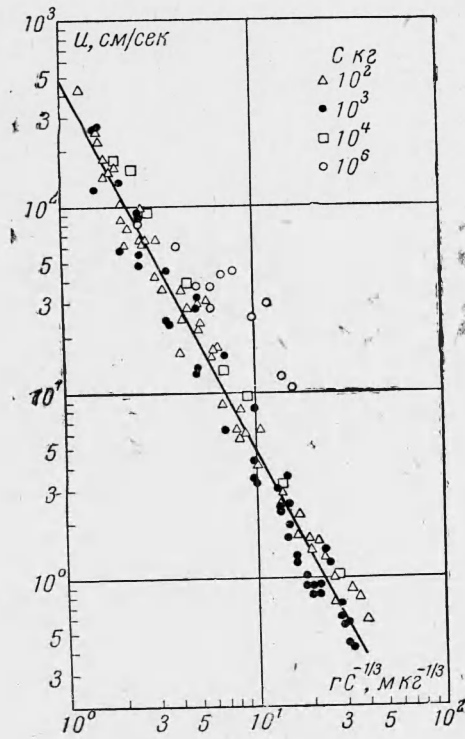




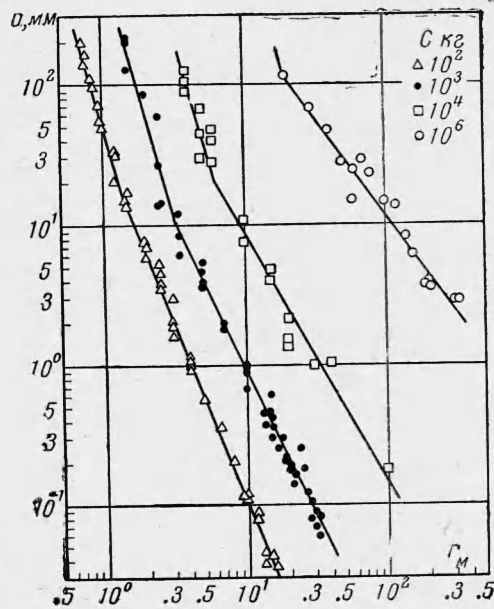
Фиг. 3

Такое различие в образовании этих волн позволит по отдельности подойти к его изучению, имея в виду реакцию одной и той же среды на различный характер возбуждения. Дальнейший количественный анализ экспериментальных данных относится только к волне сжатия (фаза P , фиг. 3).

4. На сейсмограммах видно, что волна сжатия (прямая продольная волна) выходит почти нормально к поверхности, так как первое вступление на горизонтальной составляющей относится к более длиннопериодной волне N . Можно предполагать, что одной из причин нормального выхода луча является наличие градиента скорости по глубине в слое синих глин, так как трудно предположить, что несколько метров верхнего слоя пониженной скорости смогли оказать такое сильное влияние на направление распространения фронта волны длиной в 100—400 м. За параметры волны сжатия приняты:



Фиг. 4



Фиг. 5

максимальная амплитуда смещений a (мм); время нарастания смещения до максимума τ_2 (мсек); максимальная скорость частиц u (см/сек), определяемая по максимальному углу наклона касательной на записи смещений. Зависимость максимальных скоростей частиц u от приведенного расстояния $r^0 = rC^{-1/3}$ мкг $^{-1/3}$ представлена на фиг. 4; на фиг. 5 — зависимость максимальных смещений a от расстояния r ; на фиг. 6 — время нарастания смещений до максимума — τ_2 , где a — при моделировании по Фрудру, b — при геометрическом моделировании. Для a и u соотношения между указанными параметрами аппроксимируются степенными функциями вида

$$a_i = Kr^n$$

Коэффициенты K и n и их средние квадратичные ошибки ϵ_n и ϵ_K определялись способом наименьших квадратов

$$n = \frac{m \sum \lg r_i \lg a_i - (\sum \lg r_i)(\sum \lg a_i)}{m \sum \lg^2 r_i - (\sum \lg r_i)^2}, \quad \lg K = \frac{1}{m} (\sum \lg a_i - n \sum \lg r_i)$$

$$\epsilon_n = \left(\frac{\sum \epsilon_i^2}{m-2} \right)^{1/2} \left(\frac{m}{m \sum \lg^2 r_i - (\sum \lg r_i)^2} \right)^{1/2}, \quad \lg \epsilon_K = \left(\frac{\sum \epsilon_i^2}{m(m-1)} \right)^{1/2}$$

$$(\epsilon_i = \lg K + n \lg r_i - \lg a_i)$$

Здесь m — число наблюдений, суммирование ведется от $i=1$ до $i=m$.

Для сопоставления коэффициентов K и исключения из ошибки ε_k погрешности, определяемой ошибкой ε_n , величины K и ε_k определялись при осредненном по всем взрывам показателе n .

Максимальные массовые скорости, удовлетворяющие геометрическому закону моделирования (фиг. 4), на всем измеренном диапазоне расстояний описываются зависимостью вида

$$u = K \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right)^n$$

Значения коэффициентов n и K (последний определен при осредненном $n = 1.9$) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пло- щадка	№ взрыва	Вес заряда C , кг	h° $\text{мкс}^{-1/3}$	r° $\text{мкс}^{-1/3}$	m	n	$\pm \varepsilon_n$	K	ε_k %
K2	1	10^3	0.45	1.5—31.5	15	1.83	0.03	280	+3.0 -2.8
	2	10^3	0.50	1.5—31.5	15	1.98	0.07	300	+6.0 -5.7
	4	10^3	0.70	1.5—26.5	9	1.94	0.07	510	+6.8 -6.3
	5	10^3	1.5	1.5—31.5	15	1.80	0.05	800	+4.5 -4.3
K3	6	105	0.72	1.53—17.0	12	1.89	0.05	500	+4.2 -4.0
	7	90	0.74	1.66—39.2	14	1.79	0.06	480	+7.0 -6.5
	8	120	0.51	1.58—26.4	11	1.85	0.08	390	+7.4 -7.1
	9	120	0.39	1.24—19.7	12	1.97	0.10	400	+8.8 -8.0
	10	10^3	0.44	2.0—15.0	7	1.88	0.10	540	+7.0 -6.5
	11	10^4	0.42	1.86—13.9	7	2.00	0.09	600	+5.8 -5.5
MB	13	10^4	0.42	1.85—46.4	6	1.82	0.15	880	+13.0 -11.6
	14	10^4	0.42	1.85—9.3	5	1.69	0.40	980	+24.0 -19.4

Коэффициент K представляет собой относительную характеристику энергии взрыва, передающейся объемным сейсмическим волнам. Для сосредоточенного заряда одного и того же взрывчатого вещества при постоянной плотности заряжения эта энергия зависит от глубины заложения заряда и от физико-механических свойств среды, в которой производится взрыв. Проведенных в глинистых грунтах опытов недостаточно для определения степени влияния этих факторов на интенсивность волны сжатия. Однако сравнение с аналогичными данными, полученными при взрывах в скале, позволяет сделать в этом отношении некоторые выводы. На фиг. 7 приведена зависимость коэффициента K от приведенной глубины заложения заряда $h^\circ = h_c C^{-1/3}$. Максимальные скорости частиц при ряде опытов в глинах совпадают со значениями скоростей при взрывах в скале. Это оказываются взрывы, произведенные в «сухих» глинах с содержанием воды по объему равным примерно 40%. Все опыты, проведенные в глинах с повышенной влажностью, дали завышенные значения скоростей частиц. При взрывах в лёссовидном суглинке, содержащем примерно 15% воды по объему и около 30% воздуха, волна сжатия практически не зарегистрирована. Следовательно, повышение содержания воды увеличивает интенсивность волны сжатия, а увеличение содержания воздуха действует в обратную сторону. Такие ограниченные сведения о грунте и малочисленность опытов позволяют сделать только качественные выводы о влиянии грунтовых условий.

Процессы, определяющие количество энергии, передаваемой в волну сжатия, происходят в зоне, непосредственно прилегающей к заряду, так как вне ее в замеренном интервале расстояний от 20 до 600 радиусов заряда рассеивание энергии (на

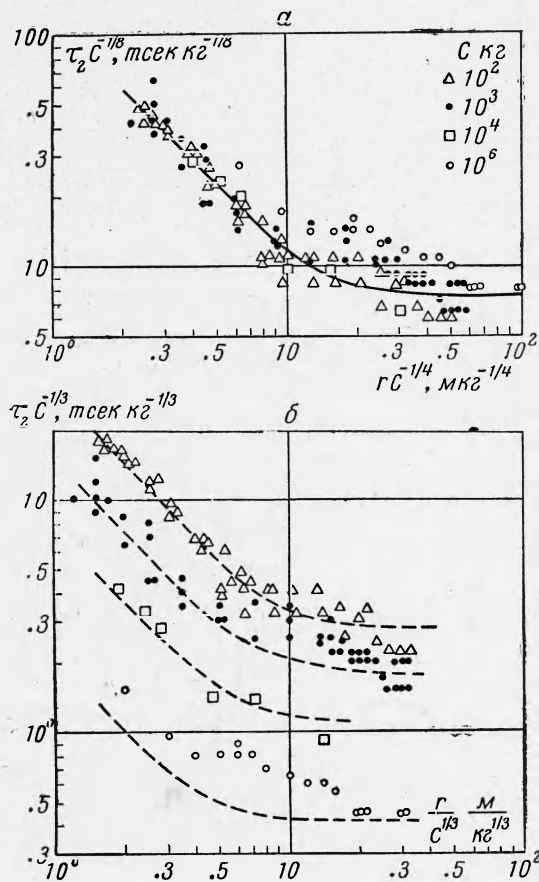
стадии нагружения среды) одинаково для всех взрывов в глине и скале (для скоростей частиц $n = 1.9 \pm 0.1$).

Если кривую скорости частиц — расстояние при больших заглублениях заряда, т. е. при максимальной отдаче энергии продолжить до стенки камеры заряда, то скорости частиц на границе полости u_0 будут соответствовать начальному давлению газов, согласно соотношению $\sigma = \rho V u$ (кривая 1, фиг. 8).

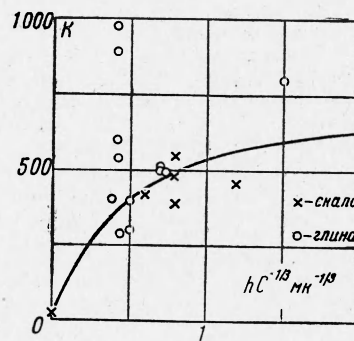
При мелкозаглубленных взрывах эта кривая на участке от 20 до 600 радиусов заряда лежит параллельно, но на более низком уровне (фиг. 7). Но приближаясь к заряду скорости должны совпасть на стенке полости со значением u_0 (кривая 2, фиг. 8).

Следовательно, на более близких расстояниях при малогазглубленных взрывах скорости частиц (и давление) должны уменьшаться более интенсивно. Это связано, по-видимому, со степенью противодействия окружающей среды расширяющимся продуктам взрыва. При мелкозаглубленных взрывах газы встречают меньшее сопротивление со стороны дневной поверхности, полость расширяется значительно и к моменту отрыва волны сжатия давления будут меньшими, чем при камуфлетных.

По-видимому, аналогично влияет и сопротивляемость разных видов грунтов. Так, незначительное увеличение пористости, мало отражаясь на величину плотности, а следовательно, и на u_0 , сильно понижает вследствие большой сжимаемости скорости частиц на



Фиг. 6



Фиг. 7

больших расстояниях. Увеличение влажности, т. е. заполнение пор, уменьшает сжимаемость и уровень кривых скорость-расстояние повышается. В этом случае на близких расстояниях затухание скорости частиц с расстоянием должно быть меньше, чем на далеких (кривая 3, фиг. 8).

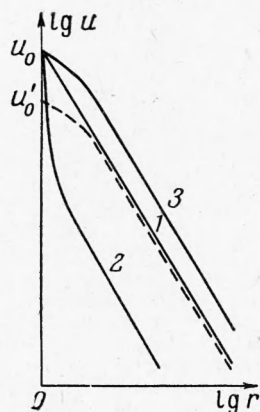
Этим можно объяснить совпадение значений скоростей частиц при взрывах в скале и глине на далеких расстояниях. При одном и том же давлении на стенке полости значение u_0 в скале будет меньше, но вблизи заряда вследствие меньшей сжимаемости скорости частиц затухают медленнее, а на замеренных расстояниях 20—600 радиуса заряда они могут совпасть (пунктирная кривая фиг. 8).

5. Дальнейший анализ параметров волны сжатия относится к основной массе опытов, проведенных в достаточно однородных грунтовых условиях при незначительных вариациях глубины заложения заряда ($h = 0.4 - 0.75 C^{1/3}$). Для них зависимость максимальных скоростей частиц от заряда и расстояния (фиг. 4) можно представить выражением

$$u = 450 \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right)^{1.9}$$

Максимальные смещения в тех же опытах в зависимости от расстояния для различных величин заряда приведены на фиг. 5. На графике достаточно отчетливо видно изменение степени затухания смещений с расстоянием. Амплитуды смещений очень резко падают вблизи эпицентра взрыва, следуя одному и тому же закону для всех зарядов, и на некотором расстоянии ($r = R_n$) начинают затухать в меньшей степени, изменяющейся от величины заряда.

Начальный участок при проведенных наблюдениях, получивший условное наименование «ближняя зона», интересен тем, что в начале его, вблизи воронки, были замечены (визуально) нарушения грунта. Это позволило предположить, что и в пределах всего участка должны быть необратимые остаточные деформации. При этом должен быть превзойден предел прочности и сцепление между частицами грунта нарушено. Сопоставление между собой записей скоростей частиц и смещений на этом участке (фиг. 9) показывает, что скорость частиц (а следовательно, и давление) нарастают до максимального значения за время τ_1 , равного нескольким миллисекундам.



Фиг. 8

В течение этого времени происходит нагружение среды и расходуется энергия, переносимая волной сжатия. За это же время смещения достигают очень незначительных величин по сравнению с максимальными в момент времени τ_2 , абсолютное значение которого больше 50 мсек (фиг. 6). Следовательно, на всем этапе роста смещений, когда происходит разгрузка напряженного состояния среды, частицы грунта движутся несвязанно одна с другой за счет кинетической энергии, полученной в момент времени τ_1 и которая будет равна потенциальной энергии подъема грунта на высоту a в момент времени τ_2 . Таким образом, должно соблюдаться соотношение

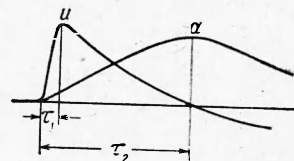
$$a = \frac{u^2}{2g} \quad \text{или} \quad a = 1000 \frac{C^{1.27}}{r^{3.8}} \text{ мм}$$

Последний результат получается подстановкой значений ускорения силы тяжести g и скорости частиц u .

Прямые на фиг. 5 в ближней зоне, проведенные согласно полученной формуле, и результаты обработки, приведенные в табл. 2, показывают, что эта зависимость достаточно точно отражает полученные результаты по измерению смещений. В этой таблице: $K^* = 10^3 C^{1.27}$ — значения из формулы, K_1 — величины, полученные из наблюдений при $n_1 = 3.8$.

Следовательно, на втором этапе процесса, начиная с момента времени τ_1 , среда подвержена действию силы тяжести и параметры движения должны удовлетворять критерию подобия Фруда, т. е.

$$\frac{a}{C^{1/4}} = K \left(\frac{C^{1/4}}{r} \right)^{3.8} \quad \text{или} \quad a = K \frac{C^{1.20}}{r^{3.8}}$$



Фиг. 9

Отметим, что зависимость от величины заряда при геометрическом моделировании должна быть

$$\frac{a}{C^{1/4}} = K \left(\frac{C^{1/4}}{r} \right)^{3.8} \quad \text{или} \quad a = K \frac{C^{1.60}}{r^{3.8}}$$

Наблюдаемые результаты показывают, что смещения, а равно и времена τ_2 (фиг. 6) близки к подобию по Фруду, но не удовлетворяют ему полностью. Это вызвано

Таблица 2

C	m	n_1	ε_n	K_1	ε_k	K^*	$R_n C^{-1/3}$
10 ²	11	-3.67	±0.28	3.58.10 ⁵	+0.22.10 ⁵ -0.20.10 ⁵	3.46.10 ⁵	2.8
10 ³	8	-4.14	±0.83	5.43.10 ⁶	+1.25.10 ⁶ -1.00.10 ⁶	6.45.10 ⁶	3.2
10 ⁴	9	-2.72	±0.66	1.55.10 ⁸	+0.16.10 ⁸ -0.14.10 ⁸	1.20.10 ⁸	2.8

тем, что в данном процессе начальные условия (скорости u) моделируются по другому закону. То, что параметры движения на втором этапе близки к подобию по Фрудру, объясняется небольшим различием в структуре формулы скоростей частиц: при геометрическом моделировании

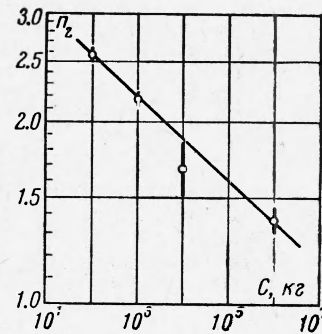
$$u = K \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right)^{1.9} \quad \text{или} \quad u = K \frac{C^{0.633}}{r^{1.9}}$$

при моделировании по Фрудру

$$\frac{u}{C^{1/3}} = K \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right)^{1.9} \quad \text{или} \quad u = K \frac{C^{0.600}}{r^{1.9}}$$

На втором участке («дальняя» зона), начиная с расстояния R_n , равного приблизительно 60 радиусам заряда, смещения аппроксимируются зависимостью вида $a = K_2 r^{n_2}$. Коэффициенты K_2 и n_2 приведены в табл. 3.

Для дальней зоны наблюдается изменение степени затухания смещений с расстоянием в зависимости от заряда (фиг. 10). Это характерно для упруго-вязких сред, где поглощение энергии зависит от частоты колебаний, возрастающая с ее увеличением. Следовательно, при взрывах в глине при прохождении волны сжатия (прямой продольной волны) в дальней зоне среда подвергается действию двух сил — упругих и вяз-



Фиг. 10

Таблица 3

C	m	n	ϵ_n	n_2	K_2	$\epsilon_k, \%$
10^2	30	-2.57	± 0.04	-2.60	$1.44 \cdot 10^4$	+3.0 -2.8
10^3	37	-2.17	± 0.05	-2.20	$1.96 \cdot 10^4$	+3.5 -3.3
10^4	11	-1.67	± 0.16	-1.85	$4.31 \cdot 10^4$	+9.3 -8.6
10^6	17	-1.37	± 0.07	-1.35	$1.61 \cdot 10^5$	+5.8 -5.3

кого трения, соизмеримых по величине. В таких условиях параметры волны должны удовлетворять двум критериям, и подобия, определяемого простыми масштабными коэффициентами, не будет.

В заключение автор благодарит Д. А. Харина за советы и критические замечания.

Поступила 23 III 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Покровский Г. И. и Федоров И. С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. Промстройиздат, 1957.
2. Садовский М. А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. АН СССР, 1956.
3. Кириллов Ф. А. Сейсмический эффект взрыва. Тр. Сейсмологическ. ин-та АН СССР, 1947, № 121.
4. Зегжда А. П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. Госстройиздат, 1938.
5. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. Гостехтеоретиздат, 1957.
6. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов. ПММ, 1960, т. 24, вып. 6.
7. Рулев Б. Г., Харин Д. А. Сейсмографы для регистрации больших перемещений. Тр. Ин-та физ. земли АН СССР, 1961, № 16 (183).
8. Киринос Д. П., Рулев Б. Г., Харин Д. А. Сейсмограф ВЭГИК для работы по инженерной сейсмологии и регистрации близких землетрясений. Тр. Ин-та физ. земли АН СССР, 1961, № 16 (183).
9. Коул Р. Подводные взрывы. ИЛ, 1950