

УДК 662.215.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТА
ПО ПАРАМЕТРАМ ПЛОСКИХ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН

С. Д. Захаров, Г. М. Ляхов, С. Д. Мизякин

(Москва)

Определение динамической сжимаемости грунтов по экспериментальным значениям параметров плоских, цилиндрических и сферических взрывных волн проводилось в основном при напряжениях, не превышающих 80—100, а в отдельных случаях 250 кг/см² [1—4]. Ниже приводятся результаты экспериментального исследования плоских волн при напряжениях до 1000 кг/см². По этим данным построена зависимость напряжение — деформация, соответствующая ударному сжатию на фронте волны. Определено уплотнение грунта. Показано, что за фронтом волны продолжается рост деформаций. Остаточные деформации больше приобретаемых на фронте. Это свидетельствует о существенном влиянии вязких и пластических свойств грунта на волновой процесс.

1. Условия проведения опытов. Эксперименты проводились в песчаном грунте средней крупности, уложенном в котлован, открытый в плотном суглинке. Глубина котлована 1.1 м, длина и ширина по 1 м. Датчики для измерения напряжения устанавливались на глубине от 5 до 70 см по мере наполнения котлована. При этом песок послойно трамбовался. Перед каждым опытом котлован очищался от песка и заполнялся вновь. На каждой глубине ставилось три датчика — в центре и на расстояниях 25 и 45 см от центра. Рядом с датчиками помещались алюминиевые пластинки диаметром 4 см и толщиной 0.05 см. Измерялось их остаточное смещение, принимаемое равным смещению грунта.

Напряжение фиксировалось высокочастотными тензодатчиками. Сигналы датчиков после усиления записывались на шлейфных осциллографах Н-105. Мембраны датчиков были обращены вверх.

Волны создавались при взрыве над котлованом плоского заряда ВВ площадью 1 × 1 м². Иницирование взрыва проводилось в центре. При скорости детонации ~ 7000 м/сек время прохождения волны до края заряда составляло ~ 0.07 мсек. Применялись заряды толщиной δ = 0.31 и 0.19 см, что соответствует плотности C = 5 и 3 кг/м³. Заряды с δ = 0.31 см подрывались непосредственно на поверхности котлована и в воздухе на высоте 10 и 20 см, заряды с δ = 0.19 см — на поверхности, а также на поверхности при обсыпке слоем грунта толщиной 40 см, длиной и шириной по 1.8 м. Грунт над зарядом не трамбовался.

Характеристики песчаного грунта: плотность скелета $\gamma_0 = 1.62-1.70$ г/см³, влажность $w = 4-8\%$, плотность $\rho_0 = (1+w) = 1.76$ г/см³, что соответствует содержанию компонентов: газообразного $\alpha_1 = 0.28$, жидкого $\alpha_2 = 0.1$, твердого $\alpha_3 = 0.62$. У суглинка, в котором отрывался котлован, $\gamma_0 = 1.76-1.80$ г/см³, $w = 8-15\%$. Опыты с обсыпкой проводились в дождливый период при $\gamma_0 = 1.62-1.70$ г/см³, $w = 10-17\%$, $\rho_0 = 1.85$ г/см³, что соответствует $\alpha_1 = 0.17$, $\alpha_2 = 0.21$, $\alpha_3 = 0.62$.

2. Результаты опытов. После взрыва наблюдалось почти равномерное остаточное смещение поверхности грунта под всем зарядом. Смещение у краев было лишь на 5—10% меньше, чем в центре. Стенки котлована разрушались до глубины 2—3 см.

Величины средних остаточных смещений (см) поверхности котлована и алюминиевых пластинок, установленных на разной глубине под центром котлована, приведены в табл. 1.

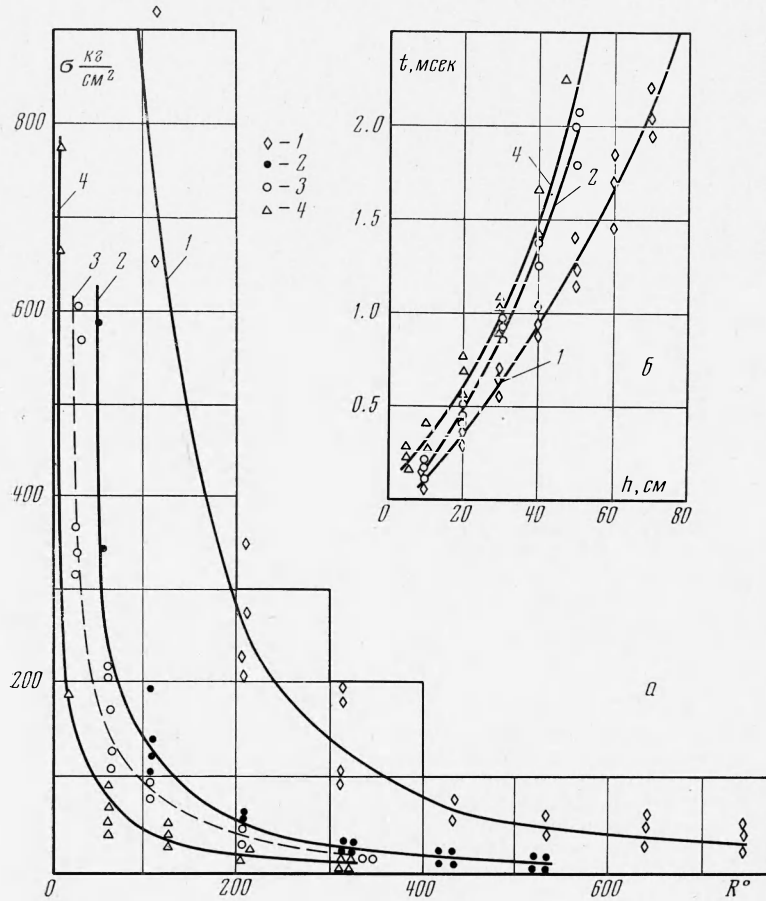
У края котлована смещения пластинок на 10—15% меньше, чем в центре, на расстоянии 25 см от центра и в центре смещения практически одинаковы.

Таблица 1

Условия взрыва	Толщина заряда, см	Начальная глубина, см							
		0	10	20	30	40	50	60	70
На поверхности	0.31	6.4	4.9	3.8	3.0	2.4	1.8	—	—
	0.19	4.2	2.9	2.2	1.8	1.5	1.3	—	—
На поверхности с обсыпкой	0.19	13.0	11.2	9.5	8.0	6.7	5.7	4.7	3.9
На высоте 10 см	0.31	5.3	4.2	3.3	2.5	2.1	1.6	—	—
На высоте 20 см	0.31	4.1	3.3	2.7	2.9	1.8	1.5	—	—

Из табл. 1 следует, что наличие обсыпки увеличивает смещение в 3.5—4 раза. При удалении заряда от поверхности смещение уменьшается.

Остаточные смещения датчиков оказались на 5—8% меньшими, чем у пластинок, хотя удельная масса датчиков на два порядка больше. Таким образом, остаточные смещения датчиков практически те же, что у окружающего грунта.



Фиг. 1

Обозначим через γ среднее значение плотности скелета грунта после взрыва в слоях толщиной 10 см, а y_1 и y_2 — величины смещений верхней и нижней границ слоя. Тогда

$$\gamma = 10\gamma_0/[10 - (y_1 - y_2)]$$

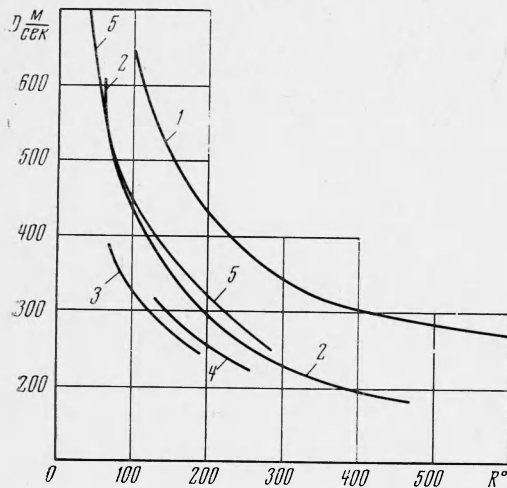
Значения γ , полученные исходя из данных табл. 1, приведены в табл. 2.

Таблица 2

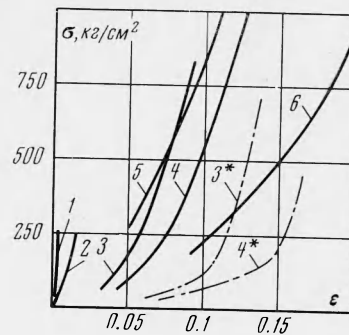
Условия взрыва	Толщина заряда, см	Начальная глубина середины слоя, см						
		5	15	25	35	45	55	65
На поверхности	0.31	1.95	1.87	1.81	1.73	1.73	—	—
	0.19	1.91	1.79	1.73	1.71	1.70	—	—
На поверхности с обсыпкой	0.19	2.03	2.00	1.95	1.91	1.85	1.85	1.81
На высоте 10 см	0.31	1.87	1.84	1.81	1.74	1.72	—	—
На высоте 20 см	0.31	1.78	1.74	1.72	1.70	1.69	—	—

Уплотнение грунта существенно зависит не только от величины заряда, но и от условий взрыва. Обсыпка заметно увеличивает, а воздушная прослойка снижает величину уплотнения. Выброс грунта обсыпки происходил на высоту 25—30 м. Поэтому можно предполагать, что дальнейшее увеличение толщины обсыпки приведет к некоторому дополнительному возрастанию плотности грунта.

Во всем исследованном интервале напряжений волны в грунте ударные. Результаты измерения параметров волн представлены на фиг. 1, а, б, 2. Во всех случаях кривые 1 соответствуют заряду с обсыпкой при $\delta = 0.19$ см, 2 — на поверхности без обсыпки, $\delta = 0.19$ см; 3 — в воздухе на высоте 10 см, $\delta = 0.31$ см; 4 — в воздухе на высоте 20 см, $\delta = 0.31$ см, 5 — на поверхности без обсыпки, $\delta = 0.31$. Зависимость максимального напряжения на фронте ударной волны от безразмерного расстояния $R^\circ = 2R/\delta$ представлена на фиг. 1, а. График, соответствующий заряду с $\delta = 0.31$ без обсыпки, практически совпадает с графиком 2. Графики построены по показаниям датчиков в центре котлована. У края напряжение на 5—10% меньше, на расстоянии 25 см от центра — такое же, как в центре.



Фиг. 2



Фиг. 3

При обсыпке напряжение возрастает в 5—6 раз. Воздушная прослойка толщиной 10 см снижает напряжение в 1.8—2.2 раза, а толщиной 20 см — в 3.5—3.8 раза.

На фиг. 1, б представлены графики зависимости пути, пройденного фронтом ударной волны, от времени, отсчитываемого от момента детонации заряда.

На фиг. 2 нанесены зависимости скорости фронта волны D от безразмерного расстояния R° , построенные по данным фиг. 1, б, а также для других исследованных случаев. Графики относятся к точкам в центре котлована. У края значения скорости на 10—15% меньше. Сопоставление кривых на фиг. 2 показывает, что наличие обсыпки приводит к значительному возрастанию скорости фронта волны на всех исследованных расстояниях, кривые 2 и 5 практически совпадают, воздушная прослойка между зарядом и грунтом обуславливает уменьшение скорости волны в грунте. С увеличением толщины прослойки скорость снижается.

Полученные зависимости $\sigma(R^\circ)$ и $D(R^\circ)$ позволяют построить экспериментальные графики динамической сжимаемости грунта на фронте волны $\sigma(\epsilon)$, т. е. при $\epsilon \rightarrow \infty$. Используя соотношения на фронте ударной волны, получим деформацию грунта, как функцию напряжения и скорости фронта

$$\epsilon = -\sigma/\rho_0 D^2$$

Графики $\sigma(\epsilon)$, построенные в соответствии с последним уравнением по данным фиг. 1, а и фиг. 2, приведены на фиг. 3. Для сопоставления там же приведены графики динамической сжимаемости некоторых других грунтов. Кривые 1, 2, заимствованные из работы [1], построены по экспериментальным значениям параметров ударных волн в водонасыщенных песчаных грунтах с $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.6$ и $\alpha_1 = 0.01$, $\alpha_2 = 0.39$, $\alpha_3 = 0.6$. Кривые 5 и 6 получены [5] при динамическом сжатии образца песчаного грунта, заключенного в стакане с недеформируемыми стенками. График 5 соответствует грунту с $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.32$, $\alpha_3 = 0.58$, а график 6 — с $\alpha_1 = 0.418$, $\alpha_2 = 0.02$, $\alpha_3 = 0.58$. Кривые 3 и 4 построены по опытным данным (табл. 1, 2), они относятся соответственно к грунтам с $\alpha_1 = 0.28$, $\alpha_2 = 0.01$, $\alpha_3 = 0.62$ и $\alpha_1 = 0.17$, $\alpha_2 = 0.21$, $\alpha_3 = 0.62$.

Номера кривых возрастают с уменьшением влажности, т. е. с увеличением содержания воздуха в грунте. Объемные веса скелета у сравниваемых грунтов отличаются незначительно.

Сопоставление кривых на фиг. 3 показывает, что с увеличением α_1 , т. е. с уменьшением влажности, кривые сначала удаляются от оси напряжений, затем, начиная примерно с $\alpha_1 = 0.17$, приближаются к ней, а при $\alpha_1 > 0.21$ снова удаляются. Подобная зависимость ранее была установлена для напряжений до 30—40 кг/см².

Кривые 3* и 4* определены по данным табл. 1. Они соответствуют остаточным деформациям грунта, кривые сжимаемости которых на фронте ударной волны обозначены 3 и 4.

Из сравнения кривых 3, 4 и 3*, 4* следует, что остаточные деформации грунта после прохождения ударной волны существенно превышают деформации, приобретаемые на фронте. Ранее [6] подобная закономерность наблюдалась при меньшем напряжении. Таким образом, в интервале напряжений до 1000 кг/см² после скачкообразного нарастания деформаций на фронте ударной волны, в период уменьшения напряжения, происходит дальнейший рост деформаций. За периодом падения напряжения и роста деформаций, по-видимому, следует период одновременного уменьшения обеих этих величин. Однако уменьшение деформаций меньше предшествующего нарастания.

Уравнение, определяющее сжимаемость неводонасыщенных грунтов при волновых процессах как при малых, так и больших нагрузках, представляет собой, следовательно, зависимость не только между напряжением и деформацией, но и между их производными. Ранее подобная зависимость экспериментально подтверждалась в области меньших напряжений [1, 6—10]. Из общего хода кривых на фиг. 3 следует, что подобный характер изменения деформации сохранится и при больших напряжениях (в несколько тысяч атмосфер).

Показано также, что волны в исследуемом песчаном грунте, уложенном в котлован, открытый в более плотном суглинистом грунте ненарушенной структуры, в первом приближении плоские, если заряд перекрывает все поперечное сечение котлована. Параметры волн в центре и у края котлована практически совпадают. Действие стенок котлована подобно действию гладкой трубы, оно обуславливает лишь незначительное уменьшение скорости фронта, смещения частиц и давления на расстоянии 4—5 см от них. Ранее было экспериментально установлено [1], что если площадь не перекрывает всего сечения котлована, то происходит заметное искажение волны за счет неоднородности процесса, у границ заряда значения напряжения и скорости фронта снижаются.

Поступила 24 V 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Г. М., Полякова Н. И. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. М., «Недра», 1967.
2. Григорян С. С., Ляхов Г. М., Мельников В. В., Рыков Г. В. Взрывные волны в лессовидном грунте. ПМТФ, 1963, № 4.
3. Рыков Г. В. Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте. ПМТФ, 1964, № 1.
4. Вовк А. А., Кононенко В. И., Лучко И. А., Плаксий В. А. Исследование параметров ударных волн при взрывах цилиндрических горизонтальных зарядов в суглинке. ПМТФ, 1969, № 3.
5. Зверев И. Н., Ляхов Г. М. Экспериментальная проверка уравнения состояния водонасыщенного грунта. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1960, № 4.
6. Ляхов Г. М. Определение вязких свойств грунта. ПМТФ, 1968, № 4.
7. Мельников В. В., Рыков Г. В. О влиянии скорости деформирования на сжимаемость лессовых грунтов. ПМТФ, 1965, № 2.
8. Ляхов Г. М., Определение динамической сжимаемости грунтов. Основания, фундаменты и механика грунтов, 1966, № 3.
9. Ставицер Л. Р. Исследование динамической сжимаемости грунтов. Сб. тр. НИИ Оснований и подземных сооружений, 1966, № 56.
10. Красников Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л., Стройиздат, 1970.