

На нагруженных кромках aa' и bb' известно одно главное напряжение $\sigma_1 = \sigma_y = \sigma_1^0$, на свободных кромках ab и $a'b'$ также известно одно главное напряжение $\sigma_2 = \sigma_x = \tau_{xy} = 0$.

Интегрированием вдоль кромок ab и $a'b'$, где $\sigma_2 = 0$, найдем напряжения σ_1 на этих кромках. Аналогично интегрированием вдоль кромок aa' и bb' найдем напряжения σ_2 на этих кромках.

Напряжения внутри области будем определять при помощи выражений (2), перемещаясь вдоль траекторий следующим образом (фиг. 2). Записывая уравнения (2) при продвижении от точек 2 и 2', найдем напряжения σ_1 и σ_2 в точке 22' (точка 22' лежит на пересечении траекторий, проходящих через точки 2 и 2', точка 23' — на пересечении траекторий, проходящих через точки 2 и 3' и т. д.). Если разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ взять по исходным точкам, то напряжения в точке 22' определяются сразу.

При высоких градиентах напряжений для большей точности следует брать средние значения разностей главных напряжений между искомой и исходными точками. В этом случае напряжения в точке 22' находятся решением системы двух уравнений (2) или при помощи последовательных приближений. Аналогично находятся напряжения в точке 23' по напряжениям в точках 22' и 3', напряжения в точке 32' — по напряжениям в точках 3' и 22' и так далее по всей области.

На фиг. 2 показаны графики распределения главных напряжений σ_1 и σ_2 по сечению $y = 0$, полученные описанным способом (пунктирные линии) и построенные при помощи известного решения этой упругой задачи (сплошные линии).

Поступила 20 VII 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. Я. Об одной возможной схеме применения метода фотоупругости к исследованию плоских упруго-пластических задач. Тр. Новосибирского института инженеров ж. д. транспорта. Трансжелдориздат, 1952, вып. 8.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН В ГЛИНИСТОМ ГРУНТЕ

Г. М. Ляхов, З. В. Нарожная

(Москва)

В последнее время вышел ряд работ, посвященных экспериментальному исследованию взрывных волн в неводонасыщенных и водонасыщенных грунтах. Рассмотрено движение слоев грунта при взрыве [1], определены параметры волн в зависимости от содержания воды и воздуха в порах [2], исследовано распространение волн в слоистых грунтах [3], подтверждена применимость условия пластичности [4], рассмотрен выброс [5] и направленное метание грунта [6]. Эти работы относились в основном к песчаным грунтам.

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований взрывных волн в глинистых (суглинистых) грунтах. Показано, что параметры волн в глинистых и песчаных грунтах с одинаковыми объемными весами скелета и влажностью близки между собой. Определены давления, при которых взрывные волны являются ударными или волнами с постепенным нарастанием давления. Подтверждена применимость принципа подобия.

Эксперименты проводились в глинистом грунте естественного сложения с объемным весом скелета $\gamma = 1.60-1.65 \text{ г/см}^3$ и весовой влажностью 6—12%. Гранулометрический состав: частицы диаметром 0.5—0.1, 0.1—0.05, 0.05—0.005, 0.005—0.001 и менее 0.001 мм составляли соответственно 20.4, 20.0, 38.0, 9.3 и 12.3%.

Волны создавались при взрывах сосредоточенных зарядов прессованного тротила весом 0.2, 0.4, 0.8 и 1.6 кг.

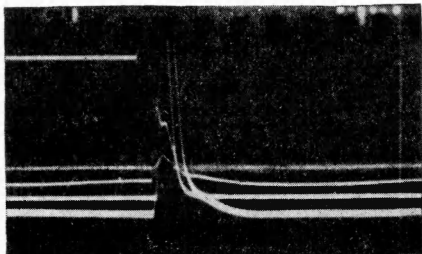
Параметры волн записывались при помощи высокочастотных тензометрических и пьезоэлектрических датчиков, показания которых фиксировались на катодном и шлейфом осциллографах. Были применены также крешерные измерители давления. Воспринимающие элементы датчиков ставились по нормали и параллельно к фронту волны. Датчики и заряды устанавливались на глубине от 0.4 до 1.8 м.

Интервал исследованных значений максимального давления волны лежит в пределах от 1 до 70 кг/см², что соответствует значениям относительного расстояния R^0 от места взрыва

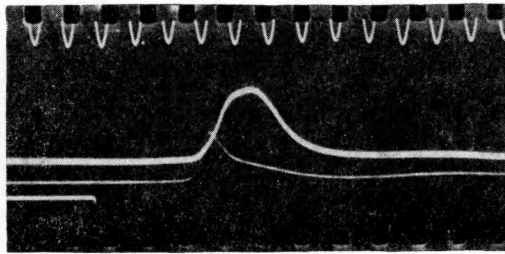
$$0.48 \leq \frac{R}{\sqrt{C}} = R^0 \leq 3$$

Здесь R — расстояние от места взрыва в м, C — вес заряда в кг.

На фиг. 1 и 2 приведены осциллограммы, записанные пьезодатчиками при взрывах зарядов весом $C = 0.8$ кг, на глубине $h = 1$ м, на расстояниях от места взрыва,



Фиг. 1



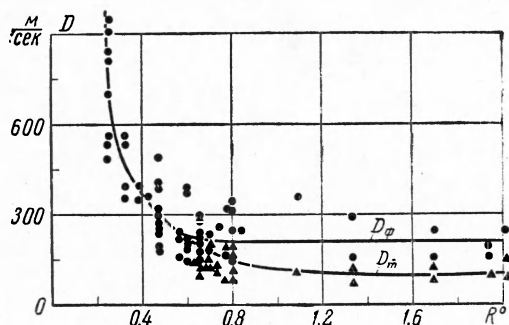
Фиг. 2

равных соответственно 0.45 и 1.3 м. Максимальное давление p_m при этом равнялось 60 и 3 кг/см².

В первом случае волна является ударной. На фронте имеет место скачок давления, за которым следует довольно быстрое его затухание. Время действия волны $\theta = 3-4$ мсек. Во втором случае нарастание давления происходит постепенно в течение 2-4 мсек, а θ возрастает до 10-15 мсек.

Опыты показывают, что при $p_m > 20-30$ кг/см² волна является ударной. При $20-30 > p_m > 10-20$ кг/см² волна также имеет скачок давления, однако перед ним с большей скоростью распространяется область малых давлений. При $p_m < 10-20$ кг/см² волна не имеет скачка.

Время действия волны θ , после того как волна перестает быть ударной, практически не меняется. Это связано с тем, что возрастает время действия малых давлений



Фиг. 3

в тыльной части волны, которое трудно зафиксировать в опытах. Время нарастания давления τ все время растет.

На фиг. 3 представлены графики зависимости от относительного расстояния R^0 $m \cdot kg^{-1/2}$ скоростей распространения фронта волны D_ϕ и максимума давления D_m ; точки в виде кружков соответствуют D_m , а в виде треугольников D_ϕ .

На близких расстояниях от места взрыва при $p_m > 20-30$ кг/см² значения D_ϕ и D_m совпадают, так как нарастание давления происходит скачком. В этой области

происходит интенсивное падение скорости с увеличением расстояния R . При меньших давлениях D_m почти не меняется, а D_m сначала падает, а затем незначительно возрастает. Средние значения D_ϕ и D_m при этом соответственно равны 200 и 100 м/сек⁻¹.

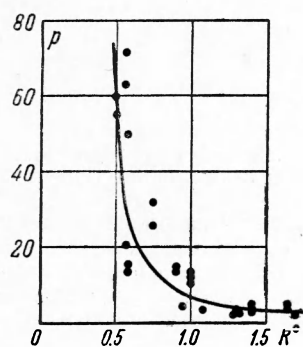
Из опытов следует, что в глинистом грунте с ненарушенной структурой и $\gamma = 1.70$ г/см³ при малых давлениях, когда волна не имеет скачка давления, $D_\phi = 220-250$ м/сек, а $D_m = 120-140$ м/сек. Таким образом, с возрастанием объема веса скелета обе скорости возрастают.

Экспериментальная зависимость максимального давления p_m от относительного расстояния R^0 в глинистом грунте с $\gamma = 1.60-1.65$ г/см³ дана на фиг. 4 и 5. Фиг. 4 соответствует показаниям пьезодатчиков. На фиг. 5 точки в виде сплошных кружков, треугольников и полых кружков относятся соответственно показаниям пьезодат-

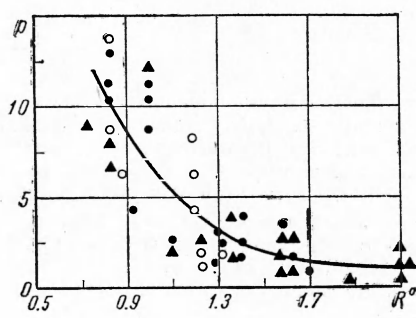
чиков, тензодатчиков и крешерных измерителей давления. Сопоставление показывает, что датчики всех типов дают практически одинаковые результаты. Эта зависимость может быть приближенно представлена в аналитическом виде, соответствующем принципу подобия

$$p_m = K_1 \left(\frac{V \bar{C}}{R} \right)^{\mu_1} \quad (1)$$

Здесь p_m — максимальное давление, C — вес заряда в кг, R — расстояние от места взрыва в м; в глинистом грунте $K_1 = 8$, $\mu_1 = 3$, если $\gamma = 1.60-1.65 \text{ г/см}^3$ и $K_1 = 11$, $\mu_1 = 3$, если $\gamma = 1.70 \text{ г/см}^3$. В случае установки воспринимающих элементов датчиков параллельно направлению движения волны максимальные значения давления оказывались равными 0.4—0.6 от значения p_m , определяемого уравнением (1).



Фиг. 4



Фиг. 5

Результаты опытов К. Лемпсона [7] подтверждают применимость уравнения (1) при $\mu_1 = 3$ к лёссовым и глинистым грунтам. Приводим значения K_1 для некоторых грунтов [7]

Вид грунта	Местонахождение	K_1
лёсс	Миссисипи	3.4
суглинок	Нью Джерси	8.4
илистая глина	Оклахома	22
глина	Техас	63

Опыты К. Лемпсона относились к интервалу относительных расстояний от места взрыва $0.78 < R^0 < 5.9$.

В песчаном грунте [2] зависимость $p_m = f(R^0)$ также имеет вид (1). При этом $K_1 = 7.5$, $\mu_1 = 3$, при $\gamma = 1.52-1.60 \text{ г/см}^3$.

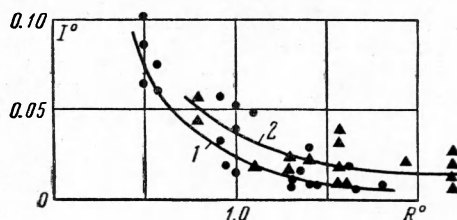
Таким образом, уравнение (1) соответствует как глинистым, так и песчаным грунтам. В неводонасыщенных грунтах $\mu = 3$. Коэффициент K_1 зависит от свойств грунта.

В водонасыщенном грунте [2] также применимо уравнение (1). Однако при изменении содержания воды и воздуха в порах грунта одновременно меняются и μ_1 (от 1 до 3) и k_1 (от 600 до 6).

Таким образом при изменении содержания жидкого и газообразного компонентов k_1 изменяется во много раз больше, чем при изменении гранулометрического состава и объемного веса скелета. Это объясняется тем, что сжимаемости водонасыщенного грунта с большим и малым содержанием заземленного воздуха отличаются в большей степени, чем сжимаемости мягких неводонасыщенных грунтов с разными размерами твердых частиц и значениями γ .

На фиг. 6 представлена зависимость импульса I взрывной волны в глинистом грунте от относительного расстояния. По оси ординат отложена величина

$$I^0 = \frac{\bar{I}}{3} \frac{\text{кг}^{2/3} \text{сек}}{\text{см}^2}$$



Фиг. 6

Кривая 1 на фиг. 6 и точки в виде кружков соответствуют показаниям пьезодатчиков, кривая 2 и точки в виде треугольников — показаниям тензодатчиков. Применяемые датчики разных типов дают несколько различные значения импульса, что связано с их различной чувствительностью. Тензодатчики, имеющие большую чувствительность, фиксируют малые давления в тыльной части волны и поэтому дают большие значения импульса

Зависимость импульса волны от расстояния может быть представлена в первом приближении в виде

$$I = K_2 \sqrt[3]{C} \left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R} \right)^{\mu_2} \left(\frac{\kappa g / \text{сек}}{\text{см}^2} \right) \quad (2)$$

В глинистом грунте $\mu_2 = 1.5$, $K_2 = 0.035$ при $\gamma = 1.60-1.65 \text{ г/см}^3$; в неводонасыщенном песчаном грунте $\mu_2 = 1.5$, $K_2 = 0.022$ при $\gamma = 1.52-1.60 \text{ г/см}^3$.

В водонасыщенном песчаном грунте μ_2 меняется от 1.05 до 1.4, а K_2 от 0.075 до 0.025. Таким образом, величины K_2 и μ_2 в меньшей степени зависят от свойств грунта, чем K_1 и μ_1 .

Формулы (1) и (2) справедливы как при камуфлетных взрывах, так и при взрывах на выброс при глубинах заложения заряда

$$h \geq 0.6 \sqrt[3]{C} \quad (3)$$

При дальнейшем уменьшении глубины заложения значения максимального давления уменьшаются. В случае взрыва накладного заряда на поверхности грунта значения давления, фиксируемые на вертикальной оси под зарядом, оказываются в 4—6 раз меньшими, чем при камуфлетном взрыве.

Отклонения результатов отдельных измерений p_m от средних значений в грунтах значительно выше, чем в других средах, например в воде или воздухе. Это связано, по-видимому, с неоднородностью грунта и трудностью достижения полной идентичности в условиях установки датчиков. В опытах, приведенных в работах [2, 7], максимальные и минимальные значения давления отличались от средних значений соответственно на 35 и 50%.

Результаты опытов качественно подтверждают применимость к глинистым и песчаным грунтам модели упруго-пластической среды. Согласно этой модели зависимость напряжения σ от деформации ϵ имеет переменный знак кривизны: при больших σ вторая производная $d^2\sigma/d\epsilon^2 > 0$, при средних значениях $d^2\sigma/d\epsilon^2 < 0$, а при малых $d^2\sigma/d\epsilon^2 = 0$. В такой среде ударные волны могут существовать только при больших и малых σ . В интервале средних значений σ состояния с меньшими напряжениями распространяются быстрее, чем состояния с большими напряжениями, и поэтому волна сжатия не имеет скачка давления на фронте. Представляется также возможным объяснить результаты опытов при помощи иного механизма, учитывающего временные факторы.

Поступила 14 III 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашов А. И., Родионов В. Н., Сухотин А. П. Взрыв в уплотняющейся неограниченной среде. ДАН СССР, 1958, т. 123, № 4.
2. Ляхов Г. М. Ударные волны в грунте и разжижение водонасыщенного песка. ПМТФ, 1961, № 1.
3. Ляхов Г. М. Отражение и преломление ударных волн в многокомпонентных средах и в воде. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1959, № 5.
4. Алексеенко В. Д., Григорян С. С., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Некоторые экспериментальные исследования по динамике мягких грунтов. ДАН СССР, 1960, т. 133, № 6.
5. Белопухов Л. К. Кинематографические исследования подземных взрывов. ПМТФ, 1960, № 4.
6. Кузнецов В. М., Лаврентьев М. А., Шер Е. Н. О направленном метании грунта при помощи взрывчатого вещества. ПМТФ, 1960, № 4.
7. Лемпсон К. Подземные взрывы. Сб. Действие атомного оружия, ИИЛ, 1954.