

**З. В. Нарожная**

(Москва)

**ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ  
СКОРОСТИ РАЗГРУЗКИ В ГРУНТЕ  
ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

В статье в развитии работы [1] рассматривается решение задачи об отражении плоской волны в грунте (как упруго-пластической среде) от неподвижной преграды с учетом влияния свободной поверхности. Проводится сопоставление результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными. Экспериментально определен характер разгрузки в грунте.

1. Воспользуемся моделью среды с различной зависимостью напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  при нагрузке и разгрузке. Аппроксимируем кривую нагрузки и разгрузки двумя прямыми. Примем, что линия разгрузки параллельна оси  $\sigma$  (рис. 1). Вторичное нагружение происходит по закону разгрузки до напряжения, достигнутого при первом сжатии, а в дальнейшем — по закону нагружения.

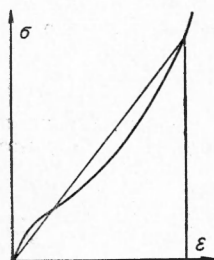


Рис. 1.

Решение основных уравнений динамики сплошной среды в координатах Лагранжа (масса  $h$ , время  $t$ ) в областях разгрузки и вторичного нагружения до предела упругости имеет вид:

$$u = \varphi_i(t), \quad (1)$$

$$p = -h \dot{\varphi}_i(t) + \psi_i(t),$$

где функции  $\varphi_i$  и  $\psi_i$  находятся из граничных условий задачи,  $i$  — номер области в плоскости  $h, t$ . Пусть в сечении  $h=0$  давление изменяется по линейному закону

$$p = p_m \left(1 - \frac{t}{\theta}\right). \quad (2)$$

В сечении  $h=h^*$  расположена неподвижная преграда. При прохождении ударной волны по грунту и отражении ее от преграды образуются области 1, 2 и 3 (рис. 2). Решения в этих областях были получены в работе [1].

В области 1 происходит разгрузка среды за фронтом ударной волны, в области 2 — возрастание давления до величины, достигнутой при первом сжатии и различной у разных частиц. Это значение является, следовательно, пределом упругости для каждой частицы.

Однако возрастание давления в области 2 происходит не с момента  $t=t^*$ , а в момент времени  $t>t^*$ , различный для разных значений  $h$ . При этом с увеличением значения  $h$  это время уменьшается.

Граница перехода разгрузки в нагрузку может быть найдена для любого значения  $h$  при  $\frac{dp}{dt} = 0$  и будет иметь вид, соответствующий пунктирной кривой (см. рис. 2).

Решение в области 2 имеет одинаковый вид как в случае разгрузки, так и для нагрузки, так как в этой области оба процесса происходят по одному закону — закону разгрузки. На границе областей 2 и 3 давление скачком возрастает, а затем постепенно падает с течением времени.

Рассмотрим дальнейшее течение отраженной волны с возрастанием времени.

Скачок давления на фронте отраженной волны (граница областей 2 и 3) по мере его продвижения к сечению  $h=0$  уменьшается, и при некотором значении времени  $t=t^{**}$  давление на фронте станет равным давлению в падающей волне.

Это время находится из условия равенства давления в областях 2 и 3 при  $t=t^{**}$  и  $h=h^{**}$ .

Давление в области 2 в соответствии с [1] определяется уравнением

$$p_2 = p_m \left[ 1 - \frac{t}{\theta} - \frac{h}{2A\theta} \left( 1 - \frac{2t}{2t^* - t} \right) \right], \quad (3)$$

и в области 3

$$p_3 = 2p_m \left[ 1 + \frac{t}{\theta} - \frac{3t^*}{2\theta} + \frac{t^*}{\theta} \ln \left( \frac{2t^* - t}{t^*} \right) \right]. \quad (4)$$

Тогда координата  $h^{**}$  этой точки определяется из условия:

$$\frac{t^*}{\theta} = \frac{1}{\frac{3}{2}x - 2\ln x - 1}, \quad \text{где } x = \frac{h^{**}}{h^*}. \quad (5)$$

Координата  $t^{**}$  определяется путем подстановки полученного значения  $h^{**}$  в уравнение границы областей 2 и 3:

$$h = A(2t^* - t).$$

При  $t=t^{**}$  образуется область 4, границей которой является характеристика, идущая параллельно оси абсцисс вследствие допущения о мгновенной разгрузке.

В области 4 происходит разгрузка среды. Поэтому решение в этой области будем искать в виде (1). Граничные условия: на поверхности грунта в сечении  $h=0$  давление задано в виде (2), при  $h=h^*$  скорость частиц равна нулю; отсюда

$$\psi_4(t) = p_m \left( 1 - \frac{t}{\theta} \right) \text{ и } \varphi_4(t) = 0.$$

Следовательно, в области 2 давление не зависит от координаты  $h$  и в любом сечении меняется со временем по тому же закону, что и на свободной поверхности.

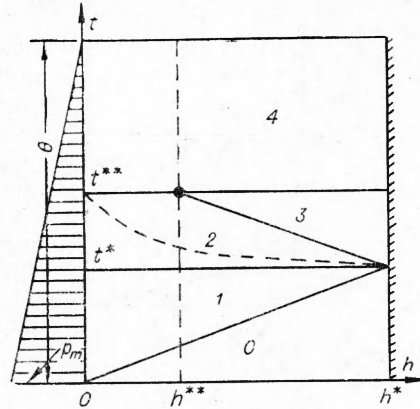


Рис. 2.

На рис. 3 показано распределение давления в среде для различных сечений:  $h=h^*$ ,  $h>h^{**}$ ,  $h=h^{**}$  и  $h<h^{**}$ . При  $h>h^{**}$  значение давления в отраженной волне (второй максимум) превосходит давление в падающей; при  $h=h^{**}$  величины этих давлений выравниваются, а при  $h<h^{**}$  давление в отраженной волне становится меньше, чем в падающей.

Момент времени  $t=t^{**}$  соответствует моменту прихода сигнала от свободной поверхности. Далее при  $t>t^{**}$  давление во всей среде меняется со временем так же, как и на свободной поверхности.

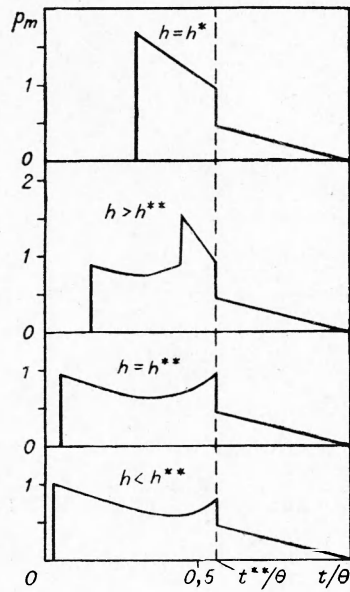


Рис. 3.

Из (5) следует, что координаты этой точки  $h^{**}$  и  $t^{**}$  зависят от акустического сопротивления  $A=c \cdot \rho$ , времени  $\Theta$  действия давления на поверхности грунта и величины  $h^*$ . На рис. 4 представлен график, изображающий зависимость  $h^{**}$  от этих величин.

Таким образом, при отражении волны от преграды в упруго-пластической среде с принятым законом разгрузки отраженная пластическая волна вблизи от преграды распространяется со скоростью волны нагрузки, а при  $t>t^{**}$  скорость отраженной волны совпадает со скоростью разгрузки.

2. Рассмотрим результаты экспериментальных исследований отражения плоской взрывной волны в насыпном неводонасыщенном песчаном грунте от неподвижной преграды. Объемный вес скелета грунта  $\gamma_{ск} = 1,55-1,60 \text{ г/см}^3$ , весовая влажность  $w = 3-5\%$ .

В качестве преграды использовалась железобетонная плита размером  $3 \times 3 \times 1,2 \text{ м}$ .

Измерения проводились тензодатчиками, сигналы которых усиливались с помощью усилителей и фиксировались на шлейфных осциллографах. Волна создавалась взрывом плоского заряда, укладываемого на поверхности грунта с различной плотностью в соответствии с методикой, изложенной в работе [2].

При проведении опытов над преградой насыпался слой грунта толщиной 1 м. Датчики устанавливались по глубине этого слоя через 0,25 м и на поверхности преграды. Эксперименты проводились в одинаковых условиях, для чего перед каждым опытом весь грунт перекапывался и датчики устанавливались заново.

Плотность заряда подбиралась таким образом, чтобы падающая волна по всей глубине грунтового слоя имела ударный фронт. Для данного грунта, как показали эксперименты, волна остается ударной при давлении  $3-5 \text{ кг/см}^2$ .

В опытах измерялись параметры падающей и отраженной волн.

На рис. 5 приведена осциллограмма, полученная в этих опытах. На приведенной осциллограмме у нижнего обреза располо-

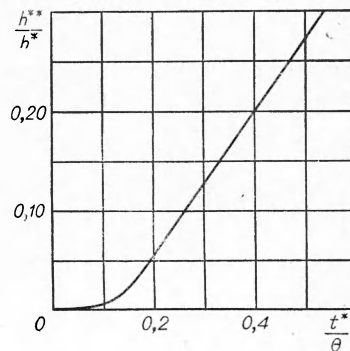


Рис. 4.

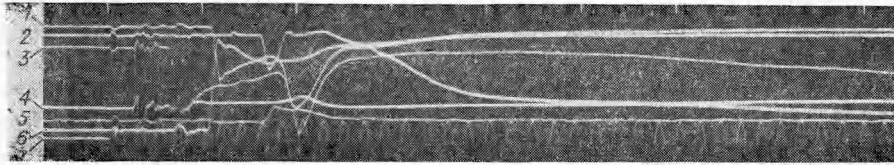


Рис. 5.

жен отметчик времени с периодом колебаний  $T=0,002$  сек. Первый отметчик времени фиксирует момент взрыва.

Лучи третий и шестой соответствуют записям датчиков, расположенных на преграде, лучам второму и седьмому, пятому, четвертому соответствуют расстояния  $R=0,25$ ;  $0,5$  и  $0,75$  м от преграды.

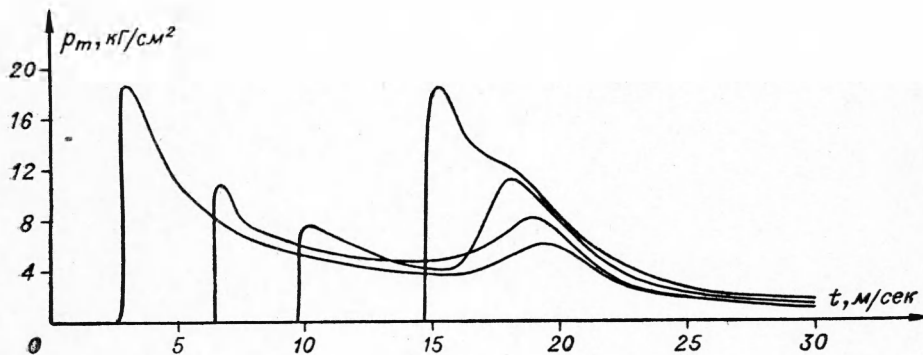


Рис. 6.

Из рис. 6, где эти зависимости даны в одном масштабе, видно, что все датчики, за исключением расположенных на преграде, фиксируют два максимума. Первый максимум соответствует падающей волне, второй — отраженной.

Величина второго максимума вблизи от преграды ( $R=0,25$  м) существенно превосходит величину первого максимума. По мере удаления от преграды относительная разница их величин уменьшается. Вдали от преграды ( $R=0,75$  м) второй максимум значительно меньше первого.

Из рис. 6 также видно, что спустя  $20-22$  мксек после момента взрыва, все датчики начинают фиксировать давление, примерно одинаковое по величине и одинаково изменяющееся во времени, что может быть объяснено, согласно приведенным выше расчетам, влиянием свободной поверхности.

На рис. 7 представлены экспериментальные данные о движении фронта падающей и отраженной волн. На близких расстояниях от преграды отраженная волна распространяется со скоростью, мало отличающейся по величине от скорости фронта падающей волны, равной  $50-60$  м/сек.

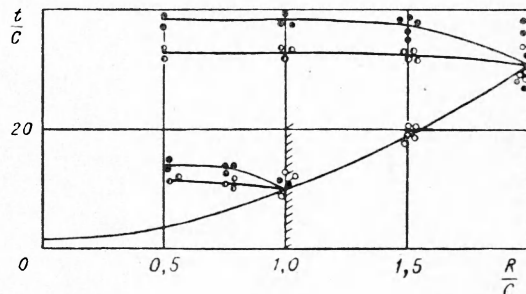


Рис. 7.

С удалением от преграды скорость фронта отраженной волны резко возрастает до величины 800—1000 м/сек. Выше, при проведении теоретических расчетов, было показано, что на больших расстояниях от преграды отраженная волна распространяется со скоростью разгрузки. Следовательно, замеренная экспериментальным путем скорость отраженной волны на этом участке соответствует значению скорости разгрузки в исследуемом грунте.

Таким образом, скорость разгрузки оказывается на порядок больше скорости нагрузки, и принятие при проведении теоретических расчетов бесконечно большой скорости разгрузки является экспериментально оправданным.

*Поступила в редакцию  
2/XI 1964*

#### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Г. М. Ляхов, Н. И. Полякова. ПМТФ, 1962, 5.
  2. Г. М. Ляхов, З. В. Нарожная. ПМТФ, 1962, 6.
-