

из условия сохранения полной энтальпии определялась температура  $T$ , после чего из уравнения состояния — плотность  $\rho$ . Параметры на ударной волне и наклон ее находились совместным решением условий на ударной волне и на характеристике, пересекающей ударную волну.

Проведенные расчеты показывают (фигура), что на отрезке  $0 \leq z \leq 50$  см температура на поверхности конуса в рассматриваемом случае уменьшается от  $5240^\circ\text{K}$  до  $3800^\circ\text{K}$ , а плотность увеличивается от  $0.1 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup> до  $0.14 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>. Равновесные (без учета релаксации) значения температуры  $3200^\circ\text{K}$  и плотности  $0.17 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>.

Описанный метод, по-видимому, неприменим в области малых изменений параметров, где параметры мало отличаются от своих равновесных значений.

Авторы благодарят Т. Я. Гришаненко, которая составила программу и провела расчеты на электронно-счетной машине, и Л. И. Северинова за полезное обсуждение работы.

Поступила 9 VIII 1962

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Современное состояние аэродинамики больших скоростей. Под ред. Л. Хоурта, т. I, М., ИЛ, 1955.
2. Duff R. E., Davidson N. Calculation of Reaction Profiles Behind Steady Shock Waves; II, The Dissociation of Air, Journ. of the Chemical Physics, 1959, vol. 31, 4, p. 1018—1027. (Русск. пер.: Дафф и Дэвидсон. Расчет неравновесной диссоциации воздуха за стационарными ударными волнами. Сб. пер. Вопросы ракетной техники, 1960, № 5 (65), стр. 40—57.)
3. Lick W. Inviscid Flow of a Reacting Mixture of Gases around a Blunt Body. Journal of Fluid Mechanics, 1960, vol. 7, 1, p. 128—144. (Русск. пер.: Лик. Невязкий поток реагирующей смеси около тупого тела. Сб. статей «Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций». М., ИЛ, 1962.)

#### ПЛОСКИЕ ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В ГРУНТАХ

Г. М. Ляхов, З. В. Нарожная

(Москва)

Излагаются результаты экспериментальных исследований плоских волн в грунтах. Проводится сопоставление параметров плоских и сферических волн, соответствующих одним и тем же грунтам. Определена зависимость параметров волн в неводонасыщенном грунте от содержания воды и воздуха в порах.

**1. Условия проведения опытов. Характеристики грунтов.** Параметры волны в грунте, создаваемой при взрыве плоского заряда, в соответствии с принципом подобия, зависят от отношения  $R^\circ$  плотности заряда  $C$  (т. е. веса заряда в кг, приходящегося на  $1 \text{ м}^2$  его площади) к расстоянию  $R$  в м от плоскости, в которой расположен заряд

$$R^\circ = \frac{R \text{ м}^3}{C \text{ кг}} \quad (1.1)$$

В опытах волны создавались при помощи зарядов, укладываемых на поверхности грунта. Сверху заряды покрывались слоем грунтовой обсыпки. Как показывают результаты опытов, возрастание толщины  $h$  обсыпки приводит к увеличению интенсивности волн в грунте. Однако это возрастание происходит лишь в некотором интервале значений  $h$ . Увеличение  $h$  свыше  $h_k$  не влияет на параметры волны. Значение  $h_k$ , полученное в опытах, составляет

$$h_k = \kappa C \quad (1.2)$$

В исследованных песчаных грунтах коэффициент  $\kappa = 3 \div 4 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Опыты проводились при  $h > h_k$ .

При взрыве плоского заряда ограниченных размеров (площади) от слоев грунта, над которыми заряд отсутствует, распространяется боковая волна разрежения, приводящая к ослаблению плоской волны. При достаточно большой площади заряда влияние волны разрежения не сказывается в некоторой центральной области под зарядом, так как давление в плоской волне здесь уменьшается до начального значения до прихода фронта боковой волны разрежения. Приводимые результаты опытов относятся к этой центральной области.

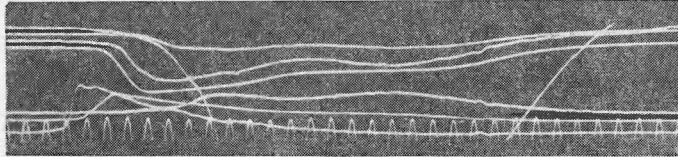
Опыты проводились в песчаных неводонасыщенных грунтах нарушенной структуры (насыпных песках) двух районов.

Пески обоих районов имели объемный вес скелета  $\gamma$  от 1.50 до 1.55 г/см<sup>3</sup>

Обозначим  $\delta$  диаметр в м.м, а  $\beta$  — процентное содержание частиц разного размера. Гранулометрический состав песка первого района характеризуется следующими данными:

$\delta$ м.м	$\geq 1$	1—0.5	0.5—0.25	0.25—0.1	0.1—0.01	0.01
$\beta$ %	15—18	10—15	30—40	15—25	5—8	2—4

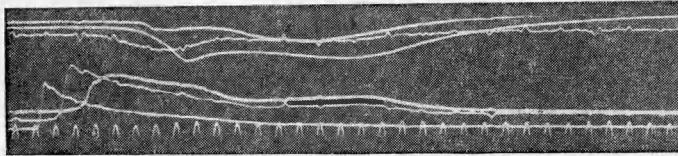
Песок второго района имел близкий состав, но содержание мелких фракций было большим, а частицы с  $\delta > 1$  м.м составляли 8—10%.



Фиг. 1

Опыты проводились в сухое и дождливое время года, при различных значениях влажности  $w$  грунта. В песке первого района значения влажности составляли  $w = 5-7\%$  и  $w = 10-12\%$ . В песке второго района  $w = 2-4\%$ .

Грунт в общем случае представляет собой трехкомпонентную среду — твердые частицы, вода, воздух. Закономерности распространения взрывных волн в первую очередь определяются содержанием этих компонентов.



Фиг. 2

Обозначим через  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  содержание в грунте по объему соответственно воздуха, воды и твердых частиц, а  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  — плотности этих компонентов при атмосферном давлении. Эти величины связаны между собой и с характеристиками грунта  $\gamma$  и  $w$  соотношениями

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \quad \alpha_3 \rho_3 = \gamma, \quad w = \frac{\alpha_2 \rho_2}{\alpha_3 \rho_3} \quad (1.3)$$

Учитывая, что  $\rho_1 = 12 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_3 = 2.65$  г/см<sup>3</sup>, получим, что для различных значений влажности  $w$  содержание воздуха составляет

$$\alpha_1 = 0.40 - 0.38 \text{ при } w = 2-4\% \\ \alpha_1 = 0.35 - 0.32 \text{ при } w = 5-7\%, \quad \alpha_1 = 0.28 - 0.24 \text{ при } w = 10-12\%$$

Измерение параметров волн осуществлялось при помощи тензометрических и пьезоэлектрических датчиков, показания которых записывались на шлейфных осциллографах. Воспринимающие элементы датчиков устанавливались перпендикулярно и параллельно направлению распространения волны и регистрировали соответственно нормальное  $p_n$  и боковое  $p_\tau$  давления.

**2. Время действия и скорость распространения волны.** На фиг. 1 и 2 приведены осциллограммы, соответствующие волнам, создаваемым при взрывах плоских зарядов с  $C = 0.12$  и  $0.25$  кг/м<sup>2</sup> в песках первого района при малой влажности. На фиг. 1 лучам 1—6 соответствуют расстояния  $R = 0.5, 0.75, 1.50, 1.0, 1.15, 1.3$  м и максимальные значения нормального давления  $p_n = 2.5, 1.3, 0.7, 1.2, 1.1, 0.6$  кг/см<sup>2</sup>. На фиг. 2 значения  $R$  и  $p_n$  составляют 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 1.75, 2.0 м и 11.0, 4.4, 2.3, 1.75, 1.0, 0.8 кг/см<sup>2</sup>. Отсчет лучей ведется от отметчика времени с периодом колебаний  $T = 0.002$  сек.

Из проведенных опытов следует, что взрывная волна перестает быть ударной при  $p_r = 3-5$  кг/см<sup>2</sup>. По мере удаления от места взрыва профиль волны, т. е. зависимость  $p(t)$ , меняется. Время  $\tau$  нарастания давления до максимального значения и общее время действия  $\theta$  увеличиваются. Особенно интенсивно  $\theta$  растет на близких расстояниях от места взрыва.

На фиг. 3 представлены графики зависимости скорости распространения фронта волны  $D_1$ , а также скорости распространения  $D_2$  максимума давления от относительного расстояния  $R^\circ$ , соответствующие песку с  $w = 5-7\%$ . На близких расстояниях от места взрыва, когда волна является ударной,  $D_1$  и  $D_2$  совпадают. Скорости  $D_1$  и  $D_2$  в песках большей влажности оказались на 20—30% большими, а в песках меньшей влажности на 20—30% меньшими. Из этого следует, что скорости  $D_1$  и  $D_2$  с увеличением влажности грунта (в исследованном интервале значений  $w$ ) возрастают.

Сопоставление приведенных данных с результатами измерения скорости фронта волны в водонасыщенных песчаных грунтах [1, 2] показывает, что в неводонасыщенном песке даже большой влажности  $w = 10-12\%$  скорость в десятки раз меньше, чем в водонасыщенном грунте с тем же значением  $w$ .

**3. Максимальное давление.** Результаты измерения максимального нормального давления приведены на фиг. 4. Кривые 1, 2, 3 относятся к пескам с  $w = 2-4, 5-7$  и  $10-12\%$ .

Из сравнения графиков следует, что с увеличением влажности грунта максимальное давление волны  $p_r$ , так же, как и скорости  $D_1$  и  $D_2$ , возрастает на всех исследованных расстояниях. Увеличение влажности грунта с 5—7% до 10—12% приводит к увеличению  $p_r$  на 30—50%.

Приведенные на фиг. 4 графики позволяют построить приближенные формулы в виде, соответствующем принципу подобия, для определения максимального давления плоской взрывной волны в неводонасыщенных грунтах различной влажности

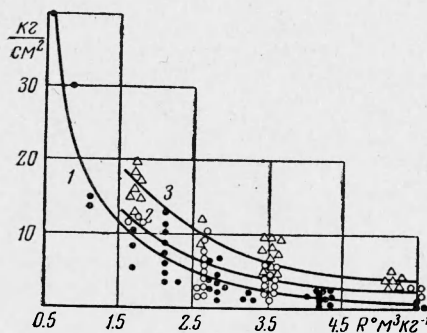
$$p_r = k_1 \left( \frac{C}{R} \right)^{\mu_1} \quad (3.1)$$

Фиг. 3

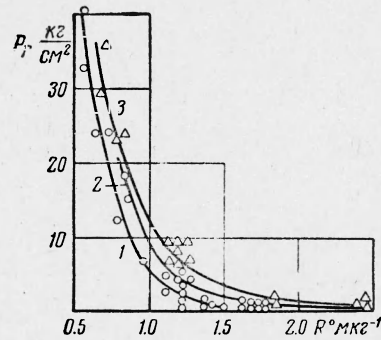
Приводим значения  $k_1$  и  $\mu_1$  для плоских волн в грунтах различной влажности:

$\alpha_1$	$w\%$	$k_1$	$\mu_1$	$k_2$	$\mu_2$
0.28—0.24	10—12	28	1.1	10.5	3
0.32—0.35	5—7	21	1.3	8.0	3.2
0.38—0.40	2—4	15	1.4	3.5	3.3

Одновременно с исследованием плоских волн в тех же грунтах были проведены опыты по определению параметров сферических волн, создаваемых при взрыве сосре-



Фиг. 4



Фиг. 5

доточенного заряда. Результаты измерения максимального нормального давления  $p_r$  сферической волны приведены на фиг. 5. В этом случае относительное расстояние

$$R^\circ = R/\sqrt[3]{C} \text{ м кг}^{-1/3}$$

Кривые 1, 2, 3, как и на фиг. 4, соответствуют грунтам с теми же значениями влажности, что и кривые на фиг. 4. Из сравнения кривых видно, что с возрастанием влажности грунта значение  $p_r$ , как и в случае плоской волны, увеличивается. Из результатов опытов следует, что возрастание влажности, соответствующее прохождению сильного дождя, может изменить значения давления и скорости взрывной волны в грунте на 30—40%.

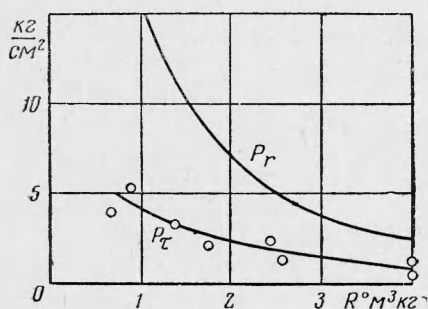
Зависимость максимального давления волны, создаваемой взрывом сосредоточенного заряда, от относительного расстояния, изображенная на фиг. 5, соответствует принципу подобия и может быть представлена в виде, предложенном в работе [1]

$$p_r = k_2 \left( \frac{\sqrt[3]{C}}{R} \right)^{\mu_2} \quad (3.2)$$

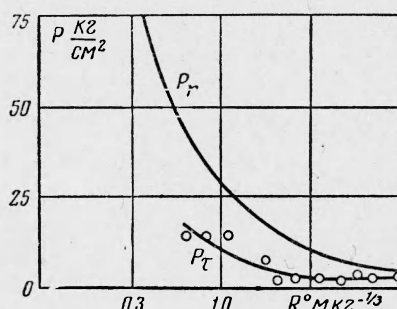
Здесь  $C$  — вес сосредоточенного заряда в кг;  $R$  — расстояние от центра взрыва в м.

Значения  $k_2$  и  $\mu_2$ , соответствующие разному содержанию воды и воздуха в порах грунта, для случая взрыва сосредоточенного заряда приведены выше. Сопоставление выражений (3.1) и (3.2) показывает, что с возрастанием относительного расстояния  $R^0$  интенсивность сферической волны убывает существенно быстрее, чем интенсивность плоской волны.

На фиг. 6 и 7 даны графики максимального нормального  $p_r$  и бокового  $p_t$  давлений, соответствующие опытам в песках с  $w = 5-7\%$ . Фиг. 6 относится к плоской, а фиг. 7 к сферической волнам. Графики  $p_r$  взяты из фиг. 4 и 5.



Фиг. 6



Фиг. 7

Опыты показывают, что в рассмотренном интервале давлений, в случае сферической и плоской волн отношение  $p_t/p_r = 0.3-0.4$ , т. е. сохраняет примерно постоянное значение. Эти результаты подтверждают данные ранее выполненных исследований [3].

Таким образом, из результатов исследований следует, что с увеличением содержания воды в порах неводонасыщенного грунта (в исследованном интервале значений  $w$ ) нормальное  $p_r$  и боковое  $p_t$  давления, а также скорость фронта  $D_1$ , соответствующие плоским и сферическим взрывным волнам, возрастают. Ранее [1] подобная зависимость была установлена для водонасыщенных грунтов. Из сопоставления значений  $p_r$  и  $D_1$  в неводонасыщенных и водонасыщенных грунтах следует, что в неводонасыщенных грунтах, даже с относительно большой влажностью ( $w = 10-12\%$ ), нормальное давление  $p_r$  и скорость  $D_1$  остаются в десятки раз меньшими, чем в водонасыщенных грунтах.

Это объясняется тем, что сжимаемость неводонасыщенного грунта [4] остается и при большой влажности большей, чем сжимаемость водонасыщенного грунта.

Поступила 18 V 1962

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Г. М. Ударные волны в грунте и разжижение водонасыщенного песка. ПМТФ, 1961, № 1.
2. Ляхов Г. М. Отражение и преломление ударных волн в многокомпонентных средах и в воде. Изв. АН СССР. ОТН, Механика и машиностроение, 1959, № 5.
3. Алексеев В. Д., Григорян С. С., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Некоторые экспериментальные исследования по динамике мягких грунтов. ДАН СССР, 1960, т. 133, № 6.
4. Ляхов Г. М., Покровский Г. И. Взрывные волны в грунтах. М., Госгортехиздат, 1962.