

## УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ГРУНТЕ И РАЗЖИЖЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ПЕСКА

Г. М. Ляхов

(Москва)

Приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований ударных волн в грунтах. Из полученных данных вытекает, что закономерности распространения волн в водонасыщенных и неводонасыщенных грунтах существенно различны. Рассматривается разжижение водонасыщенного песка при прохождении ударной волны. Проводится сопоставление результатов опытов и теоретических расчетов [1].

1. Исследование характеристик грунта. Грунт представляет собой совокупность твердых минеральных частиц, находящихся между собой в контакте, но не заполняющих всего пространства. В порах неводонасыщенного грунта содержится воздух и незначительное (по объему) количество воды. Поры водонасыщенного грунта заполнены водой и незначительным количеством воздуха, который находится в защемленном состоянии в виде мелких пузырьков.

Обозначим  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — содержание в грунте по объему соответственно защемленного воздуха, воды и твердых частиц;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  — плотность этих компонентов;  $c_1, c_2, c_3$  — скорость звука в компонентах;  $\gamma$  — объемный вес (плотность) скелета;  $n$  — пористость грунта;  $\rho_0$  — плотность грунта. Значения всех величин соответствуют атмосферному давлению. Между ними существует связь

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= 1, & \alpha_1 + \alpha_2 &= n, & \alpha_3 \rho_3 &= \gamma \\ \rho_0 &= \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \alpha_3 \rho_3 \end{aligned} \quad (1.1)$$

Экспериментальные исследования проводились в водонасыщенных и неводонасыщенных волжских песках естественного сложения и намытых земснарядом.

В песках естественного сложения плотность  $\gamma = 1.52-1.60$  г/см<sup>3</sup>.

Гранулометрический состав: частиц диаметром от 1 до 0.5 мм — 2—3%, от 0.5 до 0.25 мм — 20—30%, от 0.25 до 0.1 мм — 50—70%, менее 0.1 мм — 2—5%.

Содержание защемленного воздуха в водонасыщенном песке естественного сложения, как показали опыты [2], менялось непрерывно от 0.04—0.06 в слоях, ежегодно осушающихся, до нуля в слоях, лежащих на 5—10 м ниже наиболее низкого уровня воды в Волге. Защемление воздуха в осушающихся слоях происходит при поднятии уровня грунтовых вод во время паводка, после выпадения осадков и т. д. В неосушающихся слоях наличие защемленного воздуха связано с колебаниями температуры и давления. Растворенный в воде воздух при увеличении температуры или падении давления выделяется в свободном состоянии. Соответствующие этому значения  $\alpha_1$  существенно меньше, чем при защемлении воздуха, вследствие поднятия уровня воды.

При возведении земляных плотин и оснований гидротехнических сооружений применяются подводный и надводный намывы. Оба эти способа были использованы при намыве участков для проведения опытов. В первом случае пульпа, т. е. смесь воды и песка, подаваемая по трубам земснарядом, сбрасывается в воду. Опыты показали, что пузырьки воз-

духа, имеющиеся в пульпе при движении ее в воде, отрываются от песчинок и уходят в атмосферу. Содержание воздуха  $\alpha_1$  в намытом грунте колеблется от 0 до  $10^{-3}$ , а  $\gamma = 1.51-1.54$  г/см<sup>3</sup>.

При осушении и повторном водонасыщении песка, намытого под воду, объемный вес скелета не изменяется, а содержание воздуха  $\alpha_1$  возрастает до 0.03—0.05.

При надводном намыве пульпа сбрасывается в сухой бассейн или на намытое первым способом основание. Сбросная вода непрерывно удаляется, и намытый грунт находится в осушенном состоянии. При последующем водонасыщении значительная часть воздуха остается в защемленном состоянии. В этом случае, как показали опыты,  $\alpha_1 = 0.03-0.05$ , а  $\gamma = 1.54-1.58$  г/см<sup>3</sup>.

В лабораторных опытах наименьшее значение  $\alpha$ , составлявшее около  $10^{-3}$ , получено при намыве в воду,  $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-3}$  при отсыпке сухого песка в воду,  $\alpha_1 = 0.05$  при водонасыщении уложенного насухо песка. Наибольшее значение  $\alpha_1 = 0.1$  получено при поднятии уровня воды под действием капиллярных сил. Опыты показали, что  $\alpha_1$  мало зависит от  $\gamma$  и гранулометрического состава песка и определяется способом водонасыщения. Близкие значения  $\alpha_1$  получены П. Л. Ивановым [3].

Микрофотографированием в лотках с прозрачными стенками установлено, что защемленный воздух содержится в водонасыщенном песке в виде пузырьков, радиус подавляющего большинства которых составляет от 0.001 до 0.05 см. Небольшое количество пузырьков превышает по размерам поры песка. Если принять, что средний радиус  $r = 0.01$  см, то при  $\alpha_1 = 0.04$  и  $n = 0.4$  число пузырьков в 1 см<sup>3</sup> водонасыщенного грунта равно 9500.

Таким образом, водонасыщенный грунт является мелкодисперсной средой — твердые частицы, вода, воздух. Содержание воздуха  $\alpha_1$  в основаниях и плотинах гидросооружений, как это следует из проведенных опытов, в зависимости от способа возведения и условий эксплуатации может меняться от 0 до  $5 \cdot 10^{-2}$  общего объема грунта.

**2. Исследование ударных волн.** До последнего времени экспериментальные исследования проводились в основном в неводонасыщенных грунтах. М. А. Садовским отмечалось возрастание давления взрывной волны при повышении влажности грунта. Лемпсон [4] отмечал, что при водонасыщении глинистого грунта импульс волны возрастает в несколько раз, а максимальное давление более чем в сто раз.

Приводим результаты опытов в песчаных грунтах. Параметры волн, создававшихся при взрывах сосредоточенных зарядов прессованного тротила, записывались пьезоэлектрическими и тензометрическими датчиками, показания которых фиксировались на катодных и шлейфных осциллографах.

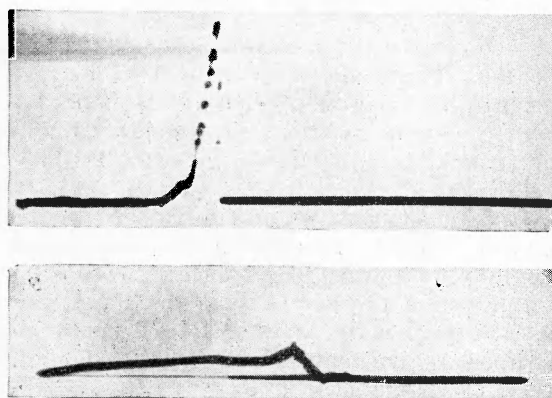
При камуфлетном взрыве в грунте образуется газовая камера. В водонасыщенном песке она, как и в воде, совершает несколько пульсаций, однако на поверхность грунта при отсутствии разжижения не всплывает. При расширении камеры продукты детонации проникают в поры. Вокруг камеры в водонасыщенном песке создается зона осушенного грунта. В неводонасыщенном и водонасыщенном песке конечный радиус камеры примерно одинаков

$$r = 0.5 \sqrt[3]{C} \quad (r \text{ — в м, } C \text{ — вес заряда в кг)} \quad (2.1)$$

Близкие размеры камеры в неводонасыщенном грунте приведены в [5]. Конечный радиус осушенной зоны в водонасыщенном песке

$$R = 0.8 \sqrt[3]{C} \quad (2.2)$$

Из экспериментов следует, что в водонасыщенном грунте с большим и малым  $\alpha_1$  профили волны, т. е. зависимости  $p(t)$ , существенно различны. Графики  $p(t)$ , представленные на фиг. 1, записаны при взрывах зарядов весом 5 кг. Верхняя осциллограмма соответствует песку с  $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-4}$



Фиг. 1

и расстоянию от места взрыва  $R = 3.3$  м; нижняя — песку с  $\alpha_1 = 4 \cdot 10^{-2}$  и  $R = 1.6$  м.

В первом случае, при малом  $\alpha_1$ , нарастание давления происходит скачком, время действия волны  $\theta$  мало. При большом  $\alpha_1$  нарастание давления происходит постепенно,  $\theta$  — велико.

В табл. 1 приводятся средние экспериментальные значения времени нарастания давления  $\tau$  и времени действия волны  $\theta$ , полученные при взрывах в водонасыщенном песке с различ-

ным  $\alpha_1$  и в неводонасыщенном грунте.

При определении  $\tau$ ,  $\theta$  и импульса волны  $I$  учитывались промежутки времени, когда давление превышало 0.05 максимального значения.

Таблица 1

| $\alpha_1$             | $C$ , кг | $R$ , м         | $\tau$ , msec | $\theta$ , msec         |
|------------------------|----------|-----------------|---------------|-------------------------|
| 0                      | 5        | 6, 12, 18       | 0             | 0.8, 1.0, 1.1           |
| $5 \cdot 10^{-4}$      | 5        | 3, 6, 9, 12, 18 | 0             | 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.6 |
| $10^{-2}$              | 5        | 2, 4, 6         | 0, 0, 0.1     | 2.4, 2.5, 2.6           |
| $4 \cdot 10^{-2}$      | 5        | 1.3, 1.6, 3     | 0.1, 0.5, 0.8 | 4, 6, 6                 |
| Неводонасыщенный песок | 5        | 1.5, 2.3, 3.2   | 0.5, 1.8, 2.0 | 12, 14, 16              |
| $5 \cdot 10^{-4}$      | 40       | 6, 12, 18, 36   | 0             | 1.6, 1.8, 1.9, 1.9      |
| $4 \cdot 10^{-2}$      | 40       | 3, 4.5, 6.5     | 0, 0.5, 1.0   | 9, 14, 18.0             |
| $5 \cdot 10^{-4}$      | 100      | 8, 16, 24       | 0             | 1.8, 2.0, 2.0           |
| Неводонасыщенный песок | 20       | 1.8, 2.6, 3.2   | 0, 1.0, 1.7   | 14, 20, 20.0            |

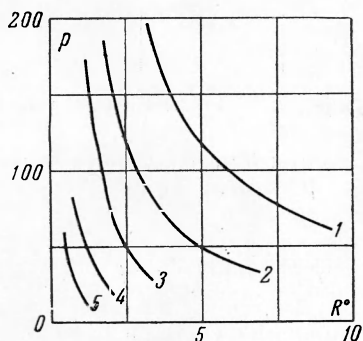
Из результатов опытов следует, что в водонасыщенном грунте, лишенном заземленного воздуха или содержащем его в количестве, не превышающем тысячных долей объема, ударные волны подобны волнам в воде; при подходе фронта волны давление скачком возрастает до максимального значения  $p_m$ , а затем убывает по закону, близкому к экспоненциальному до значений, составляющих  $0.2 \div 0.3 p_m$ . После этого падение давления замедляется. В водонасыщенном грунте с большим содержанием воздуха ( $\alpha_1 = 4 \cdot 10^{-2}$ ) и в неводонасыщенном грунте при большом давлении волна по-прежнему имеет скачок на фронте, при малом же давлении нарастание давления происходит постепенно. С увеличением  $\alpha_1$  возрастают  $\tau$  и  $\theta$ . В неводонасыщенном грунте  $\tau$  и  $\theta$  имеют существенно большие значения, чем в водонасыщенном грунте.

Таким образом, применение к взрывным волнам в грунте термина «ударные волны», соответствующего наличию скачка давления, будет в некоторых случаях условным.

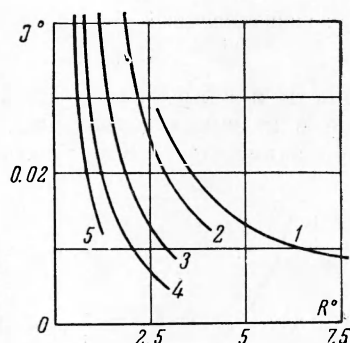
Величины максимального давления  $p_m$  импульса  $I$  и скорости фронта ударной волны  $D$ , как показывают результаты опытов, существенно зависят от  $\alpha_1$ . На фиг. 2—4 даны графики зависимости этих величин

$$p_m \text{ кг/см}^2, \quad I^\circ = I / \sqrt[3]{\bar{C}} \text{ кг сек см}^{-2} \text{ кг}^{-1/3}, \quad D \text{ м сек}^{-1}$$

от относительного расстояния  $R^\circ = R / \sqrt[3]{\bar{C}} \text{ м кг}^{-1/3}$ , построенные по средним экспериментальным значениям.



Фиг. 2



Фиг. 3

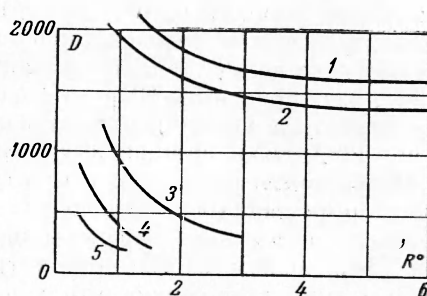
Кривые 1, 2, 3, 4 на этих фигурах соответствуют водонасыщенному песку с  $\alpha_1$ , равным  $0.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $10^{-2}$ ,  $4 \cdot 10^{-2}$ , кривая 5 относится к неводонасыщенному песку. Отклонения  $p_m$  в отдельных опытах от средних значений достигали 35%.

Значения  $\tau$ ,  $\theta$ ,  $p_m$ ,  $D$ ,  $I$  одинаковы в водонасыщенных песках естественного сложения и намывных земснарядом при одинаковом содержании в них заземленного воздуха.

Приведенные на фиг. 2 и 4 результаты опытов позволяют построить приближенные формулы в виде, соответствующем принципу подобия для определения максимального давления и импульса ударной волны в различных грунтах

$$p_m = k_1 \left( \frac{\sqrt[3]{\bar{C}}}{R} \right)^{\mu_1} \quad (2.3)$$

$$I = k_2 \sqrt[3]{\bar{C}} \left( \frac{\sqrt[3]{\bar{C}}}{R} \right)^{\mu_2} \quad (2.4)$$



Фиг. 4

Здесь  $\bar{C}$  — вес заряда ВВ в кг;  $R$  — расстояние от центра взрыва в м;  $p_m$  — максимальное давление в кг/см²,  $I$  — импульс волны в кгсек/см².

В табл. 2 приведены значения  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  для водонасыщенных грунтов с разным  $\alpha_1$  и неводонасыщенного грунта.

Величина  $k_1$  в неводонасыщенном песке растет с увеличением  $\gamma$ . Максимальное значение  $k_1$  превышает приведенное не более чем в два раза.

Скорости  $c_0$  и  $c_1$  распространения в неводонасыщенном песке фронта волны и максимума давления при малых давлениях, когда  $k_1 = 7.5$ , соответственно равны  $c_0 = 180-200$  м/сек,  $c_1 = 80-100$  м/сек.

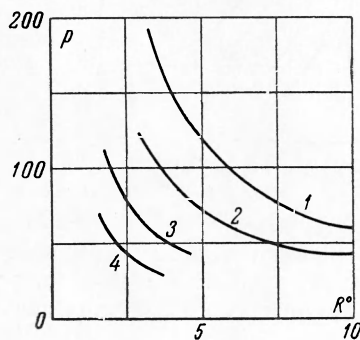
Формулы (2.3) и (2.4) соответствуют взрывам без выброса грунта. При уменьшении глубины установки заряда и датчиков до  $h = 0.6 \text{ м}$  параметры волны не меняются. Дальнейшее сокращение глубины обуславливает уменьшение  $p_m$  и  $I$ . Ослабление волны связано с влиянием свободной

Таблица 2

| $\alpha_1$                | $k_1$ | $\mu_1$ | $k_2$ | $\mu_2$ |
|---------------------------|-------|---------|-------|---------|
| 0                         | 600   | 1.05    | 0.08  | 1.05    |
| $5 \cdot 10^{-4}$         | 450   | 1.5     | 0.075 | 1.1     |
| $10^{-2}$                 | 250   | 2.0     | 0.045 | 1.25    |
| $4 \cdot 10^{-2}$         | 45    | 2.5     | 0.025 | 1.4     |
| Неводонасыщенный<br>песок | 7.5   | 3.0     | 0.022 | 1.5     |

поверхности и с прорывом газов в атмосферу в период времени, когда давление в камере еще велико.

В воде зависимость максимального давления от веса заряда и расстояния согласно [6] имеет вид



Фиг. 5

$$p_m = 533 \left( \frac{V \bar{C}}{R} \right)^{1.13} \quad (2.5)$$

Из сопоставления (2.3) и (2.5) следует, что в водонасыщенном песке, не содержащем воздуха, давление с расстоянием падает медленнее, чем в воде, но уже при  $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-4}$  падение давления в грунте становится более интенсивным.

При отсутствии или малом содержании воздуха в водонасыщенном грунте максимальное давление в десятки и даже сотни раз больше, чем в неводонасыщенном грунте.

С возрастанием  $\alpha_1$  значения  $p_m$  существенно уменьшаются, однако даже при больших  $\alpha_1$  (0.03—0.04) они оказываются еще во много раз большими, чем в неводонасыщенном грунте.

Импульс волны падает с увеличением  $\alpha_1$  в меньшей степени, чем давление, примерно в 5—10 раз. Это объясняется тем, что с ростом  $\alpha_1$  давление падает, а время действия волны  $\theta$  возрастает. Однако увеличение  $\theta$  не полностью компенсирует уменьшение давления.

Возрастание интенсивности затухания ударных волн при увеличении содержания заземленного воздуха можно объяснить возрастанием энтропийных потерь [7]. Деформация и смещения отдельных слоев грунта при сферическом взрыве рассмотрены в работе [8].

Опытами установлено, что в водонасыщенном песке значение давления, записываемое датчиками, не зависит от ориентации датчиков относительно фронта волны. В неводонасыщенном грунте при расположении воспринимающей плоскости датчика вдоль и перпендикулярно направлению движения волны различия в показаниях достигают 40—60%.

На фиг. 5 приведены графики максимального давления  $p$  кг/см<sup>2</sup> при первом (кривые 1 и 3) и повторном (кривые 2 и 4) взрывах заряда на одном и том же месте в водонасыщенном песке в зависимости от  $R^\circ$  мкг<sup>-1/2</sup>; вес заряда в обоих случаях 5 кг; положение датчиков между взрывами не менялось; кривые 1 и 2 соответствуют песку с  $\alpha_1 = 0$ , кривые 3 и 4 — песку с  $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ . При повторном взрыве давление существенно меньше. Это объясняется тем, что продукты детонации проникают в поры грунта и создают вокруг места взрыва область с большим содержанием газообразного компонента. При повторном взрыве ударная волна проходит по этой области, что и обуславливает ее ослабление.

Если центр второго взрыва и путь волны до датчика находятся вне области, насыщенной продуктами детонации первого взрыва, то давление

не меняется, хотя вторая волна и движется по области, где проходила первая волна. Это показывает, что прохождение ударной волны само по себе не вызывает каких-либо заметных необратимых изменений свойств водонасыщенного грунта, влияющих на характер распространения ударных волн. В неводонасыщенном грунте параметры взрывных волн существенно зависят от величины давлений, испытанных грунтом ранее.

Сопоставление опытов Лемпсона [4] с результатами, приведенными в данной работе, показывает, что все выводы о зависимости параметров взрывных волн от содержания воды и заземленного воздуха в порах грунта остаются в силе и для глинистых грунтов.

Большие различия в значениях параметров волн в водонасыщенных и неводонасыщенных грунтах свидетельствуют о различии в механизме сжимаемости этих грунтов. В неводонасыщенном грунте противодействие сжатию оказывает твердый скелет грунта. В водонасыщенном грунте суммарная сжимаемость воды и заземленного воздуха, заполняющих поры, оказывается меньшей, чем сжимаемость скелета; противодействие сжатию оказывают жидкий и газообразный компоненты. Поэтому сжимаемость водонасыщенного грунта не зависит от сжимаемости скелета, определяемой смятием твердых частиц в точках контакта и их переукладкой. При больших давлениях следует также учитывать объемную сжимаемость твердого компонента.

Исходя из этого, при рассмотрении волновых процессов в водонасыщенных и неводонасыщенных грунтах должны применяться различные модели сред.

К неводонасыщенному грунту применима модель упруго-пластической среды с переменным знаком кривизны зависимости напряжения от деформации  $\sigma = f(\epsilon)$ .

Водонасыщенный грунт, как было показано [1], можно рассматривать как трехкомпонентную мелкодисперсную среду, сжимаемость которой определяется содержанием и сжимаемостью компонентов. Подобная модель, как следует из опытов, применима в широком интервале значения  $\alpha_1$  и давления  $p$ , за исключением области больших  $\alpha_1 > 0.02-0.05$  при малых  $p < 3-6 \text{ кг/см}^2$ .

Уравнение состояния, полученное на основе этих предпосылок, имеет вид

$$\rho = \rho_0 \left\{ \alpha_1 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{-\eta_1} + \alpha_2 \left[ \frac{(p-p_0)k_2}{\rho_2 c_2^2} + 1 \right]^{-\eta_2} + \alpha_3 \left[ \frac{p-p_0}{\rho_3 c_3^2} + 1 \right]^{-\eta_3} \right\}^{-1} \quad (2.6)$$

Здесь  $p$  и  $\rho$  — текущие, а  $p_0$  и  $\rho_0$  — начальные давление и плотность грунта;  $k_1, k_2, k_3$  — показатели изэнтроп компонентов

$$\eta_1 = \frac{1}{k_1}, \quad \eta_2 = \frac{1}{k_2}, \quad \eta_3 = \frac{1}{k_3}$$

Скорость фронта ударной волны

$$D^2 = \frac{p-p_0}{\rho_0} \frac{\rho}{\rho-p_0} \quad (2.7)$$

Подставляя сюда  $\rho = f(p)$  из уравнения (2.6), получим связь между скоростью фронта  $D$  и давлением на фронте  $p$  в водонасыщенном грунте в виде

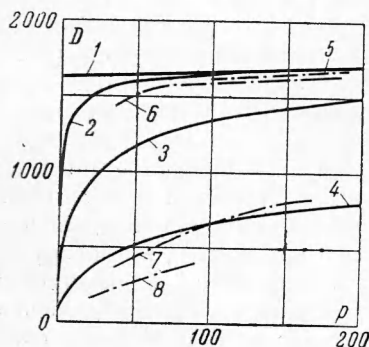
$$D^2 = \frac{p-p_0}{\rho_0} \left\{ 1 - \alpha_1 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{-\eta_1} - \alpha_2 \left[ \frac{k_2(p-p_0)}{\rho_2 c_2^2} + 1 \right]^{-\eta_2} - \alpha_3 \left[ \frac{k_3(p-p_0)}{\rho_3 c_3^2} + 1 \right]^{-\eta_3} \right\}^{-1} \quad (2.8)$$

где  $\rho_0$  определяется в соответствии с (1.1).

На фиг. 6 сплошными линиями представлена зависимость  $D \text{ мсек}^{-1}$  от  $p \text{ кг см}^{-2}$ , вычисленная в соответствии с (2.8) при  $\alpha_1 + \alpha_2 = 0.4$ ,  $\rho_1 = 12 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_2 = 1 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_3 = 2.65 \text{ г/см}^3$ ,  $c_1 = 330 \text{ м/сек}$ ,  $c_2 = 1500 \text{ м/сек}$ ,  $c_3 = 4500 \text{ м/сек}$ ,  $k_1 = 1.4$ ,  $k_2 = k_3 = 3$ . Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют содержанию воздуха  $\alpha_1 = 0 \cdot 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$ ; эксперимен-

тальные кривые 5, 6, 7, 8, построенные по графикам фиг. 2, 3, соответствуют  $\alpha_1 = 0,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $10^{-2}$ ,  $4 \cdot 10^{-2}$ .

Сопоставление графиков свидетельствует о хорошем совпадении экспериментальных и теоретических кривых, что подтверждает применимость к водонасыщенному песку модели многокомпонентной среды и уравнения состояния (2.6).



Фиг. 6

**3. Исследование разжижения.** Некоторые водонасыщенные пески при динамических воздействиях вибрации, ударе, землетрясении, взрыве и др. переходят в разжиженное состояние, которое заключается в потере контактов между частицами грунта и превращении его в вязкую жидкость. При разжижении грунт на некоторое время теряет несущую способность, находящиеся на нем тяжелые предметы тонут, а сооружения получают значительные осадки. Возможность перехода в разжиженное состояние соглас-

но [8-11] определяется характером и интенсивностью динамического воздействия, плотностью песка, гранулометрическим составом, окатанностью зерен, напряжением в скелете, обусловленным его собственным весом и внешней статической нагрузкой. Связь характеристик разжижения и взрывных волн, а также зависимость разжижения от содержания заземленного воздуха оставались неисследованными. Эти вопросы рассматриваются ниже. Наличие разжижения в опытах определялось по величине осадок поверхности грунта и марок.

Марки представляют собой стальные цилиндры длиной 50 см и диаметром 5 см, к верхнему концу которых крепится тонкая проволока. Они устанавливались в грунте на разной глубине. Концы проволок выходили на поверхность грунта, что позволяло фиксировать при помощи осциллографа начало, продолжительность и величину погружения марок при разжижении. При камуфлетном взрыве заряда весом  $C = 5$  кг осадки марок достигали 120 см, а поверхности грунта 20—25 см. При отсутствии разжижения, в тех же условиях, осадки не превышали 2—4 см. Поэтому за границу зоны разжижения на поверхности грунта была принята линия, на которой осадки поверхности и марок составляли 2—4 см.

Проведенные опыты показали, что разжижение имеет место при распространении сферической, цилиндрической и плоской волн. Разжижение начинается в момент прохождения ударной волны. Переход в разжиженное состояние при взрыве объясняется, по-видимому, тем, что на фронте волны твердые и жидкие частицы приобретают вследствие различной плотности и сжимаемости различную скорость. Смещаясь относительно скелета, вода его разрушает. Различие в скорости компонентов существует короткое время, затем грунт движется как единая среда.

В случае сферической или цилиндрической волны разрушение скелета связано также со сдвигом песчинок, так как каждый сферический или цилиндрический слой перемещается с увеличением радиуса.

Разжижение при взрывах в полевых условиях имело место не во всех случаях. Разжижение отсутствовало в водонасыщенных песках естественного сложения и намытых земснарядом надводным способом при значениях  $\gamma = 1.52-1.58$  г/см<sup>3</sup>,  $\alpha_1 = 3 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-2}$ , а также в песках, намытых под воду, с  $\gamma = 1.51-1.54$  г/см<sup>3</sup>, а затем осушенных и вновь насыщенных водой ( $\alpha_1 = 3 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$ ).

Разжижение имело место в песках естественного сложения с  $\gamma = 1.52-1.58$  г/см<sup>3</sup> и  $\alpha_1 = 0 \div 10^{-3}$  и в песках, намытых под воду, с  $\gamma = 1.51-1.54$  г/см<sup>3</sup> и  $\alpha_1 = 0 \div 10^{-3}$ .

В лабораторных условиях разжижение рыхлых песков с  $\gamma < 1.50 \text{ г/см}^3$  получено как при малом, так и большом содержании воздуха. В плотных песках с  $\gamma > 1.60 \text{ г/см}^3$  разжижение отсутствовало как при малых, так и при больших значениях  $\alpha_1$ .

Таким образом, из опытов следует, что разжижение при взрыве происходит только при определенных значениях  $\gamma$  и  $\alpha_1$ . Наличие заземленного воздуха не исключает возможность перехода водонасыщенного песка в разжиженное состояние, однако возрастание  $\alpha_1$  обуславливает уменьшение объемного веса скелета, при котором разжижение отсутствует.

Наличие или отсутствие разжижения, как показали опыты, не зависит от веса заряда. Поэтому для определения разжижаемости какого-либо песка достаточно провести взрывы зарядов небольшого веса.

Размеры и форма зоны разжижения зависят от глубины установки заряда. При взрыве в однородном грунте на большой глубине зона разжижения имеет форму, близкую к сфере; при взрыве вблизи свободной поверхности — форму чаши, расширяющейся к поверхности грунта. Наибольшие размеры у поверхности грунта зона разжижения имеет при взрыве заряда на глубине (в м)

$$h_k = 2.5 \sqrt[3]{C} \quad (C — \text{вес заряда в кг}). \quad (3.1)$$

Приводим значения величины среднего радиуса  $r_m$  зоны разжижения по поверхности грунта при  $h = h_k$  для некоторых значений веса заряда

|           |    |    |     |      |
|-----------|----|----|-----|------|
| $C = 1.6$ | 5  | 40 | 100 | [кг] |
| $r_m = 9$ | 14 | 30 | 40  | [м]  |

Результаты опытов позволяют дать приближенные формулы для определения радиуса зоны разжижения и времени пребывания песка в разжиженном состоянии

$$r_m = l \sqrt[3]{C}, \quad T = m \sqrt[3]{C} \quad (3.2)$$

$T$  — продолжительность разжижения в сек.

Приводим значения  $l$  и  $m$  для различной глубины  $h^\circ = h/\sqrt[3]{C}$  заложения заряда

|               |     |      |    |
|---------------|-----|------|----|
| $h^\circ = 5$ | 2.5 | 1.25 | 0  |
| $l = 4$       | 8   | 5    | 2  |
| $m = 60$      | 40  | 30   | 10 |

Отклонения  $r_m$  и  $T$  в отдельных опытах от средних значений достигали 30%. Величины осадок марок  $h_m$  растут с весом заряда, так как растет глубина зоны разжижения, а следовательно, и продолжительность разжижения  $h_m = 80 \text{ см}$  при  $C = 1.6 \text{ кг}$  и  $h_m = 200 \text{ см}$  при  $C = 100 \text{ кг}$ .

При горизонтальной поверхности грунта величина зоны разжижения имеет вполне определенные размеры. При наличии наклонных поверхностей, например в намывных плотинах, происходит растекание разжиженного песка и зона, где сказывается влияние разжижения, значительно превышает размеры, соответствующие приведенным выше формулам.

При наличии над водонасыщенным песком с малым  $\alpha_1$  слоя песка с большим  $\alpha_1$ , или неводонасыщенного песка, размеры зоны разжижения уменьшаются, как это и отмечалось ранее [12]. Разжижение поверхностного слоя такого песка происходит обычно через 5—10 сек после взрыва и начала разжижения нижележащих слоев. Под тяжелыми предметами поверхностный слой до начала разжижения прогибается подобно упругой пленке. Такое постепенное распространение разжижения связано, по-видимому, с общей неустойчивостью системы, состоящей из разжиженной массы и относительно тонкого неразжиженного слоя, и не вызывается непосредственно ударной волной [11].

После окончания разжижения происходит процесс консолидации грунта, рассмотренный В. А. Флориным [13]. Консолидация и формирование новой структуры начинается в нижних слоях и постепенно распространяется вверх, как показывают опыты, со средней скоростью примерно равной  $0.2 \text{ м/сек}$ . Песок при этом укладывается с плотностью, большей начальной, что приводит к понижению поверхности грунта. Средние значения осадки грунта  $\Delta h$  в эпицентре при взрыве зарядов разного веса на глубине  $h_k$  оказались равными

|                 |    |    |     |      |
|-----------------|----|----|-----|------|
| $C = 1.6$       | 5  | 40 | 100 | [кг] |
| $\Delta h = 10$ | 20 | 30 | 45  | [см] |

При консолидации грунта отжимаемая вода, двигаясь вверх и в стороны от места взрыва, может вызвать разрушение структуры слоев грунта, не пришедших в разжиженное состояние при взрыве. Однако этот процесс сказывается в ограниченной области и быстро затухает.

Из сопоставления уравнений (2.3) и (3.2) следует, что в песке с  $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-4}$  разжижение происходит в зоне, где максимальное давление волны превышает  $20 \text{ кг/см}^2$ . При  $\alpha_1 = 4 \cdot 10^{-2}$  такое давление имеет место на расстоянии  $R^0 = 1.4 \text{ м/кг}^{1/2}$ . Однако разжижение в таком грунте не получено. Отсутствие разжижения при большом содержании воздуха, следовательно, не может быть объяснено только меньшими значениями максимального давления. Оно связано, по-видимому, с постепенным нарастанием давления при подходе волны, обуславливающим уменьшение разности скоростей жидкого и твердого компонентов. Относительное смещение компонентов не достигает значений, необходимых для разрушения скелета грунта.

Исходя из результатов опытов, для предотвращения разжижения, наряду с увеличением плотности, может быть рекомендовано искусственное повышение в водонасыщенном песке содержания воздуха путем подачи его под давлением или путем осушения песка на короткое время.

При исследовании разжижения учтен ряд советов В. А. Флорина. Автор приносит благодарность В. И. Белокопытову, Б. А. Бобырю, Н. В. Замориной, П. Л. Иванову, В. П. Кузьмину, З. В. Нарожной, П. А. Соколову, М. М. Сокольскому, И. А. Соловьеву, Г. Ф. Суслонову, Г. М. Сюндюкову и др., принимавшим участие в экспериментах.

Поступила 11 VI 1960

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Г. М. Ударные волны в многокомпонентных средах. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1959, № 1.
2. Коган Я. Л. Определение содержания газа в водонасыщенном песке методом замораживания. Гидротехническое строительство. Госэнергоиздат, 1959, № 2.
3. Иванов П. Л. и Аккулишина Е. П. Содержание свободного газа в водонасыщенном песчаном грунте. Научно-технический бюллетень Ленингр. политехн. ин-та, 1958, № 1.
4. Лемпсон К. Подземные взрывы. Сб. Действие атомного оружия, ИИЛ, 1954.
5. Покровский Г. И. Расчет зарядов выброса. Сб. Действие взрыва в грунте, Промстройиздат, 1954.
6. Коул Р. Подводные взрывы. ИИЛ, 1950.
7. Зверев И. Н. и Ляхов Г. М. Экспериментальная проверка уравнения состояния водонасыщенного грунта. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1960, № 4.
8. Ромашов А. И., Радионов В. Н., Сухотин А. П. Взрыв в уплотняющейся неограниченной среде. ДАН СССР, 1958, т. 123, № 4.
9. Флорин В. А. Явление разжижения и способы уплотнения рыхлых водонасыщенных песчаных оснований. Изв. АН СССР, ОТН, 1952, № 6.
10. Маслов Н. Н. Условия динамической устойчивости водонасыщенных песков. Научн. тр. Ленингр. инж.-стр. ин-та, 1954, № 18.
11. Гольдштейн М. Н. Внезапное разжижение песка. Сб. Вопросы геотехники, Стройиздат, 1953.
12. Иванов П. Л. Особенности разжижения песчаных водонасыщенных грунтов при наличии пригрузки и дренажа. Изв. АН СССР, ОТН, 1956, № 8.
13. Флорин В. А. Теория уплотнения земляных масс. Стройиздат, 1948.