

## ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В МЯГКИХ ГРУНТАХ

*В. Д. Алексеевко, С. С. Григорян, Л. И. Кошелев,  
А. Ф. Новгородов, Г. В. Рыков*

(Москва)

Вопросы, связанные с распространением взрывных волн в грунтах, представляют известную актуальность. Интересно рассчитать волновую картину, возникающую в грунте вблизи от очага взрыва (подземного или наземного) или при прохождении ударной волны из воздуха или воды в грунт. На значительных расстояниях от очага эта картина может быть описана уравнениями теории упругости, на более же близких расстояниях эти уравнения непригодны и должны быть заменены другой системой уравнений, учитывающих сложный характер деформирования и течения среды при высоких напряжениях, и лишь в пределе при убывании напряжений переходящих в уравнения линейной теории упругости. Такого рода математическая модель среды предложена в работах [1,2] для описания движений мягких грунтов (пески, глины и т. д.).

В этой модели фигурируют в качестве характеристик среды функции  $f$  и  $F$

$$p = f(\rho, \rho_*) \quad J_2 = F(p), \quad p = -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}), \quad J_2 \equiv \frac{1}{2}(\sigma_{ij} + p\delta_{ij})(\sigma_{ij} + p\delta_{ij})$$

Здесь  $p$  — среднее напряжение (давление),  $\rho$  — плотность среды,  $\rho_*$  — некоторая мера [2] остаточной объемной деформации,  $J_2$  — второй инвариант девиатора тензора напряжений.

Функции  $f(\rho, \rho_*)$  и  $F(p)$  для конкретной среды должны быть заданы, чтобы система уравнений, описывающая движения этой среды, стала вполне определенной. Эти функции нужно строить на основе экспериментов. Эксперимент же должен решить и вопрос о пригодности или непригодности предлагаемой системы уравнений.

В работах [1,2] были предложены схемы опытов для измерения нестационарных полей напряжений, создаваемых взрывом в грунте.

Для проведения такого рода измерений были разработаны специальные измерители давления — тензометрические датчики, работающие по известной схеме: чувствительный элемент (упругая мембрана с наклеенным на нее проволочным тензометром, являющаяся частью жесткой коробки и воспринимающая нормальное давление в грунте), кабель, усилитель, шлейфовый осциллограф. Исследование условий работы такого рода датчика давления, проведенное А. Ф. Новгородовым, позволило рационально определять его конструктивные параметры. Для того чтобы результаты измерений, проводимых при помощи описанных датчиков путем помещения их в массив грунта, в котором возбуждаются волны напряжений взрывом заряда ВВ, искажались в минимальной степени, ввиду невозможности сделать датчик очень маленьким, необходимо принять меры к тому, чтобы характерный размер изучаемого явления и характерное время его протекания были достаточно большими, что возможно только при проведении опытов в полевых условиях с использованием зарядов ВВ достаточно больших размеров. В самом деле, при этом длина волны напряжений (характерный размер явления) будет много больше размера датчика, а время действия волны — много больше периода собственных колебаний мембраны датчика и времени, в течение которого существуют отраженные и дифракционные волны вблизи датчика, возникающие в момент прохождения мимо датчика фронта волны. Воздействие волны напряжений на датчик будет в основном протекать квазистатически, и датчик будет регистрировать напряжение проходящей волны как функцию времени в малоискаженном виде.

В соответствии со сказанным опыты проводились в полевых условиях.

Описанный выше датчик позволяет измерять только нормальное напряжение, действующее в грунте на площадке, с которой совпадает плоскость мембраны датчика. Поэтому, имея такие датчики, можно измерить с необходимой полнотой поля напряжений, обладающие достаточно высокой симметрией, т. е. одномерные поля напряжений (плоские, цилиндрические и сферические волны). Действительно, в этом случае координатные площадки являются главными, т. е. на них действуют только нормальные напряжения, поэтому достаточно в каждой точке измерить эти напряжения, ориентируя мембрану датчика по соответствующим площадкам. При этом в случае плоских и сферических волн имеется всего два существенно разных нормальных напряжения ( $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  или  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ ), а в случае цилиндрических — три ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ). Поэтому для измерения напряжений в каждой точке в первых двух случаях нужно помещать два датчика, а в третьем — три. Понятно, что датчики помещаются не в одну физическую точку, а в разные точки, одинаково удаленные от центра, плоскости или оси симметрии. Нами были произведены измерения такого рода для случаев центральной и цилиндрической симметрий в достаточно полном объеме. Небольшая часть полученных результатов опубликована [3], некоторые дополнительные данные в качестве иллюстрации приводятся ниже.

В процессе обсуждения возможностей измерения полей напряжений, не обладающих достаточной симметрией, в частности осесимметричного поля напряжений, возбуждаемого взрывом заряда ВВ, расположенного на небольшой глубине или на поверхности грунта, мы пришли к заключению о возможности изготовления и использования специального датчика, который измерял бы в данной точке сразу все четыре существенно разные компоненты тензора напряжений осесимметричного поля напряжений. Идея здесь довольно простая, — измерив нормальные составляющие напряжения на трех взаимно-перпендикулярных площадках и еще на одной площадке, не совпадающей ни с одной из них и ориентированной относительно этих площадок известным образом, можно вычислить все компоненты тензора напряжений в данной точке, ориентируя упомянутую тройку площадок определенным образом в осесимметричном поле напряжений. В. Д. Алексеев был спроектирован, изготовлен и испытан специальный датчик, у которого имеются четыре мембраны с тензотрами, три из которых располагаются на гранях корпуса кубической формы, а четвертый на грани, полученной сечением куба плоскостью, наклоненной под углом  $45^\circ$  к двум смежным граням куба. Датчик весит  $0.5 \text{ кг}$ , средний удельный вес его  $1.6 \text{ г/см}^3$ , длина ребра куба  $70 \text{ мм}$ . Внешний вид датчика представлен на фиг. 1.

Ориентируя датчик так, чтобы плоскость одной из мембран совпадала с плоскостью меридиана, а трех других, нормали к которым лежат в одной плоскости, были бы перпендикулярны к плоскости меридиана, причем так, чтобы плоскости тех двух из них, которые перпендикулярны одна к другой, были бы перпендикулярны к координатным осям  $r, z$  цилиндрической системы координат  $r, \theta, z$ , можно измерять при помощи тензотров на трех взаимно-перпендикулярных гранях нормальные напряжения  $\sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_r$ , а четвертый тензотр даст нормальное напряжение  $\sigma_n$ . Тогда единственное отличное от нуля касательное напряжение  $\tau_{rz}$  можно вычислить по формуле

$$\tau_{rz} = \frac{\sigma_n - (\sigma_r \cos^2 \alpha + \sigma_z \sin^2 \alpha)}{\sin 2\alpha} \quad (2)$$

где, как отмечалось выше,  $\alpha = \pi/4$ .

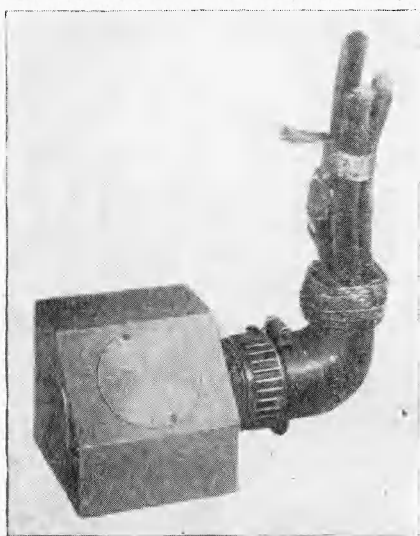
Напряжение  $\sigma_\theta$  является главным в силу осевой симметрии. Ориентацию двух других главных площадок в плоскости меридиана можно определить углом между главным направлением и направлением на центр взрыва

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \left[ 2 \frac{\sigma_n - (\sigma_r \cos^2 \alpha + \sigma_z \sin^2 \alpha)}{(\sigma_z - \sigma_r) \sin 2\alpha} \right] \quad (3)$$

Испытание датчика, в частности, содержало эксперимент, в котором датчик помещался строго на оси симметрии на некоторой глубине под центром взрыва. В этой точке в силу симметрии  $\tau_{rz} = 0$ . Поэтому, если четырехмембранный датчик, действительно, удовлетворительно выполняет свою функцию, то вычисленная по его показаниям при помощи формулы (2) величина  $\tau_{rz}$  должна быть также равна нулю. Точно так же должна быть равна нулю величина  $\varphi$ , вычисленная по показаниям датчика по формуле (3). Приводим результаты одного из таких опытов в песке

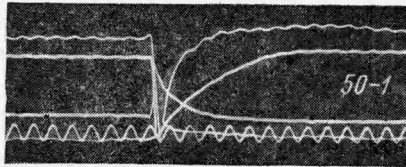
$$\sigma_\theta = 1.23, \quad \sigma_n = 2.50, \quad \sigma_z = 3.80, \quad \sigma_r = 1.36, \quad \tau_{rz} = 0.07 \text{ кг/см}^2, \quad \varphi = 1.6^\circ$$

Точность измерения напряжений в грунте вообще не может быть достаточно высокой из-за того, что процедура помещения датчика в массив грунта является неизбежно грубой операцией, приводящей к погрешностям, которые не могут быть сделаны очень малыми. Из приведенных данных видно, что величина  $\tau_{rz}$  почти на два порядка меньше всех остальных напряжений, т. е. находится в пределах погрешности измерения напряжений, которая может доходить до 20—30%. Точно так же величина  $\varphi$  достаточно мало отличается от нуля. Осциллограмма напряжений, из которой получены приведенные величины, показана на фиг. 2. Приведенные величины соответствуют максимальным напряжениям кривых на осциллограмме (снизу вверх  $\sigma_\theta, \sigma_n, \sigma_z$  и  $\sigma_r$ ; отсчетчик времени — синусоида с частотой  $500 \text{ гц}$ ), т. е. параметрам непосредственно за фронтом ударной волны. В опыте датчик был помещен в песчаный грунт естественного сложения на глубине 20 радиусов заряда под зарядом из тротила весом  $1.6 \text{ кг}$ .

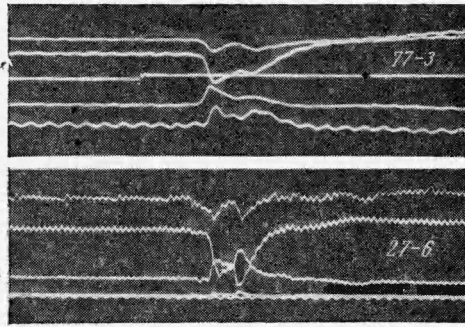


Фиг. 1

При помощи четырехмембранных датчиков были произведены измерения полей напряжений, возбуждаемых в песчаном грунте естественного сложения взрывом зарядов тротила на поверхности грунта. Результаты этих измерений позволили выявить некоторые качественные и количественные особенности нестационарного поля напряжений и построить простые эмпирические формулы для зависимости основных параметров волны напряжений (максимальные напряжения, время действия и т. д.) от расстояния до центра, угла с осью симметрии и т. д. В частности, оказалось, что в некоторой, довольно значительной, области вокруг оси симметрии картина напряженного состояния качественно сходна с таковой для случая центральной симметрии. Кроме того, оказалось, что в приповерхностной зоне распространяются две ударные волны, причем, как показали проведенные опыты и как это следует из теоретических соображений, первая волна порождается волной давления, распространяющейся по воздуху, а вторая идет по возмущенному движением от первой волны грунту непосредственно из очага взрыва.



Фиг. 2



Фиг. 3

Пример осциллограмм для указанной зоны приведен на фиг. 3. На пленке с пометкой 27-6 записаны напряжения от взрыва на поверхности грунта заряда тротила весом 12,8 кг в точке, отстоящей на расстоянии 20 радиусов заряда (т. е. на расстоянии 2,52 м) от центра взрыва и находящейся на прямой, проходящей через центр заряда под углом  $15^\circ$  к поверхности грунта. На пленке 77-3 — то же самое для заряда весом 1,6 кг, расстояния 40 радиусов заряда (т. е. опять на расстоянии 2,52 м), прямой, проведенной из точки измерения в центр взрыва под углом  $12^\circ$ .

На всех линиях (правда, недостаточно хороших из-за погрешностей в настройке электрической аппаратуры) отчетливо видны два максимума (порядок расположения линий вверх от отметчика времени тот же, что и на фиг. 2, т. е.  $\sigma_\theta, \sigma_n, \sigma_z, \sigma_r$ , отметчик времени — 500 гц). Внимательное рассмотрение пленки 27-6 показывает, что оба максимума соответствуют скачкообразному изменению напряжения. Это означает, что по грунту распространяются одна за другой две ударные волны, тогда как в точке на оси симметрии (фиг. 2) регистрируется лишь одна ударная волна. (Некоторый «завал» линий в местах скачкообразного изменения напряжений связан с ограниченной разрешающей способностью регистрирующей аппаратуры, в частности шлейфового осциллографа.) Далее следует обратить внимание на то, что во втором скачке разрыв терпят все измеряемые напряжения, в том числе  $\sigma_\theta$ . Это свидетельствует о том, что скачок является продольным, т. е. таким, на котором обязательно терпят разрыв нормальные к фронту скачка составляющие скорости частиц, напряжения и плотность, а не сдвиговым разрывом, т. е. такой поверхностью, на которой терпят разрыв касательная к поверхности фронта составляющая скорости и касательное напряжение на площадке, параллельной фронту (в последнем случае, как можно показать,  $\sigma_\theta$  должно было бы оставаться непрерывным, чего нет на осциллограмме). Этот вопрос специально изучался экспериментально и другим путем. Именно, был поставлен опыт, в котором часть массива грунта, где помещался датчик, надежно экранировалась от действия воздушной ударной волны. При этом на записи датчика первый скачок исчезал, а второй — нет, причем время его прихода оставалось примерно тем же, что и в случае, когда экранировка отсутствовала. Это свидетельствует о том, что второй скачок порожден возмущением, идущим по грунту из очага взрыва, а не есть скачок сдвига, порожденный, как и первый, воздушной ударной волной, распространяющейся вдоль поверхности. В случае, когда экранировки нет, воздушная ударная волна, вообще говоря, обязательно должна порождать в грунте не только продольную ударную волну, но также и сдвиговую, идущую за продольной. То обстоятельство, что эта вторая волна не регистрируется датчиком, связано, по-видимому, с тем, что из-за малости скоростей волн (нелинейных и звуковых) в грунте по сравнению со скоростью воздушной волны, наклоны к поверхности грунта фронтов волн, идущих в грунте от действия на него воздушной волны, малы (особенно у сдвиговой волны); это, как можно показать, при-

водит к тому, что интенсивность сдвигового скачка оказывается малой величиной, которая и не регистрируется датчиком.

На пленке 77-3 (средняя линия — отметчик момента взрыва заряда) любопытным является то, что в то время как первый максимум остается скачкообразным (кажущаяся большая размытость этого скачка по сравнению со скачками на пленке 27-6 связана с тем, что масштабы времени на этих пленках разные, как это видно из сравнения отметок времени на пленках), второй максимум уже оказывается существенно сглаженным. Это объясняется тем, что первый максимум создается воздушной волной, которая затухает медленнее волн, идущих в грунте, поэтому интенсивность первого скачка достаточно долго сохраняется высокой, так что он остается скачком, имеющим скорость, превышающую скорость звука в невозмущенном грунте. Второй же скачок, идущий непосредственно из очага взрыва по грунту, затухает быстрее и, как это установлено экспериментально [3] и следует из теоретических рассуждений [2], вскоре становится дозвуковым (т. е. его скорость становится меньше скорости звука на фронте возмущений), после чего он весьма быстро истощается, и зависимость напряжения от времени становится непрерывной, т. е. скачок исчезает. Как показывают эксперименты, в условиях центральной симметрии на расстоянии 40 радиусов заряда это уже имеет место. Если учесть, что волны от наземного взрыва затухают быстрее, чем от подземного, то становится ясным, что на пленке 77-3 (расстояние 40 радиусов заряда) второй максимум и подавно уже не должен быть разрывом напряжений.

Как отмечалось выше, измерение поля напряжений при взрыве в грунте позволяет построить функции  $F(p)$  и  $p_* = f(p_*, p_*)$ , описывающие пластические свойства среды при сдвиге и ее объемную деформируемость.

На фиг. 4 приводится зависимость  $p_*$  от  $\theta_* = 1 - \rho_0/p_*$ , где  $\rho_0$  — начальная плотность,  $p_*$  — плотность непосредственно за фронтом ударной волны, построенная по результатам измерения поля напряжений в песчаном грунте, возбужденного взрывом заглубленного заряда, в условиях, когда волна напряжений обладала центральной симметрией. Зная по результатам этих измерений  $\sigma_{r\max}$  и  $\sigma_{\theta\max}$  — значения напряжений на ударной волне как функции расстояния от центра взрыва и закон движения ударной волны, можно построить зависимость  $p_* \equiv f(p_*, p_*) = f_1(p_*)$ , т. е. нагрузочную ветвь диаграммы объемного деформирования грунта [2]. В самом деле, по определению,

$$p_* = -(\sigma_{r\max} + 2\sigma_{\theta\max})/3 \equiv p_*(R) \quad (4)$$

где правая часть — известная из опыта функция расстояния  $R$ . Далее из условий на ударной волне можно получить соотношение

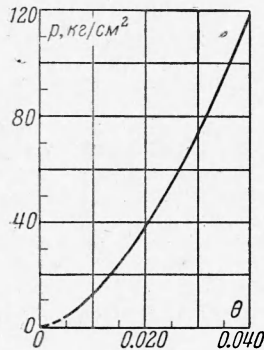
$$\theta_* \equiv 1 - \frac{\rho_0}{p_*} = \frac{-\sigma_{r\max}(R) + \sigma_{r0}}{\rho_0 [\dot{R}(R)]^2} \equiv \theta_*(R) \quad (5)$$

где правая часть  $\theta_*(R)$  — снова известная из опыта функция  $R$ . Исключая из (4) и (5) параметр  $R$ , получаем искомую зависимость  $p_* = p_*(\theta_*)$ .

Важно отметить следующее. Если произвести опыт, аналогичный описанному, в том же самом песчаном грунте, но предварительно разрыхленном и затем утрамбованном, и построить по результатам опыта зависимость  $p_*$  от  $\theta_*$  для этого случая, то она оказывается существенно другой, а именно, кривая для опыта в песке нарушенной естественной структуры идет заметно ниже кривой, изображенной на фиг. 4.

Это главным образом связано с тем, что плотность грунта нарушенной структуры была заметно ниже плотности грунта естественного сложения.

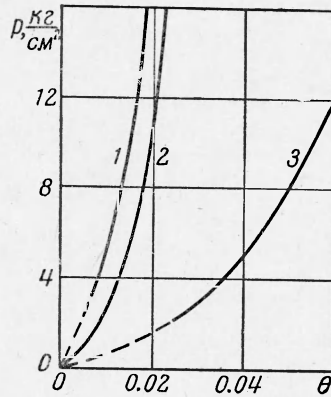
С другой стороны, кривая  $p_* = p_*(\theta_*)$ , построенная по результатам статических лабораторных опытов, проведенных Г. В. Рыковым по схеме работы [2] для того же песка с нарушенной естественной структурой, но имеющей начальную плотность, близкую к естественной, оказывается близкой кривой для грунта естественного сложения, построенной по результатам взрывных опытов. Сказанное иллюстрируется фиг. 5, на которой приводятся три такие кривые. Кривая 1 соответствует результатам взрывных опытов для грунта естественной структуры, имевшего объемный вес скелета  $\rho_0 = 1.50 \text{ г/см}^3$  и объемную влажность  $W = 10\%$ , кривая 2 относится к статическим лабораторным опытам для образца того же грунта, но предварительно нарушенной структуры, имевшего объемный вес скелета даже несколько больший  $\rho_0 = 1.57 \text{ г/см}^3$  и объемную влажность  $W = 10\%$ , кривая 3 построена по результатам взрывных опытов в том же грунте, но с нарушенной структурой, с объемным весом  $\rho_0 = 1.40 \text{ г/см}^3$  и влажностью  $W = 15\%$ . На фиг. 5 видно, что несмотря на то, что в статическом опыте начальная плотность была даже несколько выше, чем у грунта естественного сложения, сжимаемость грунта в статическом опыте на 15–20% превосходит сжимаемость естественного грунта при динамических условиях. Следует, однако,



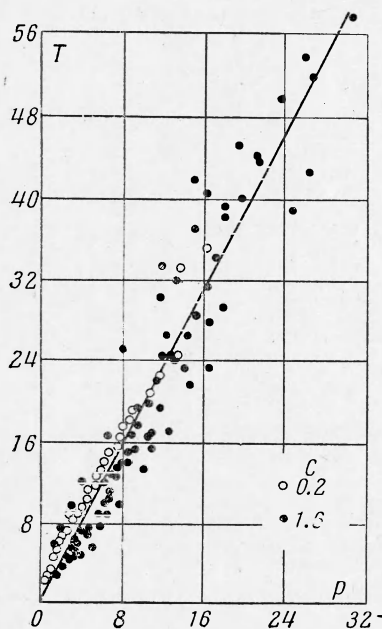
Фиг. 4

иметь в виду, что результаты статических опытов носят предварительный и сугубо оценочный характер, и для окончательных выводов относительно результатов взрывных и статических опытов нужно иметь данные тщательно выполненных статических опытов. Вместе с тем близость кривых 1 и 2 на фиг. 5 свидетельствует о применимости к испытанному в наших опытах грунту гипотезы работ [1,2] о существовании универсальной зависимости  $p = f(\theta, \theta_*)$ . В качестве другой теоретической гипотезы в работах [1,2] было сделано предположение, что грунт в состоянии течения с развитыми пластическими деформациями характеризуется тем, что при этом течении выполняется условие пластичности, т. е. между компонентами тензора напряжений удовлетворяется универсальная для данного грунта зависимость вида  $J_2 = F(p)$  (см. формулы (1)).

Были поставлены опыты, в которых создавались центральносимметричные поля напряжений (путем подрыва сосредоточенного заряда на глубине, превышавшей 30—40 радиусов заряда) и цилиндрически симметричные поля напряжений (путем подрыва удлиненных зарядов длиной 10 м на таких же глубинах) и производилось измерение этих полей, т. е. измерение на разных расстояниях от заряда главных напряжений ( $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  или  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ ) как функций времени  $t$ . Для каждого расстояния строились затем функции  $J_2 = J_2(t)$  и  $p = p(t)$  и исключением параметра  $t$  строилась зависимость  $J_2 = J_2(p)$ . Затем построенные таким образом для разных расстояний зависимости  $J_2(p)$  сравнивались между собой. Кроме того, сравнивались эти зависимости, построенные для существенно разных геометрических условий с цилиндрической симметрией и центральной симметрией. Сравнение показало, что все эти зависимости совпадают в пределах точности измерений. Это свидетельствует о том, что универсальная функция пластичности  $F(p)$ , действительно, существует. Часть данных, относящихся к этому вопросу, приводится в работе [3]. На фиг. 6—8 приводятся дополнительные данные для песчаного грунта естественного сложения.



Фиг. 5



Фиг. 6

На фиг. 6 приведена зависимость  $T = F(p)$ , где  $T = \sqrt{6J_2}$ , для расстояния  $10 r_0$  ( $r_0$  — радиус заряда) при весах  $C$  заряда 0.2 и 1.6 кг.

На фиг. 7 та же зависимость, что и на фиг. 6, а также данные для расстояния  $15 r_0$  и весов заряда 0.2, 1.6, 25 и 200 кг. Кроме того, имеются данные измерения напряжений на расстоянии  $5 r_0$ , которые также укладываются в эту же единую зависимость  $J_2(p)$ . Отметим, что на расстоянии  $5 r_0$  измеренные напряжения оказались весьма значительны. ( $-\sigma_{r\max} = 225 \text{ кг/см}^2$ ,  $-\sigma_{\theta\max} = 70 \text{ кг/см}^2$ ).

Как отмечалось выше, при помощи четырехмембранного датчика было произведено измерение осесимметричного поля напряжений при контактном взрыве. Полученные результаты позволили, в частности, построить функцию пластичности  $F(p)$  для условий контактного взрыва, когда тензор напряжений имеет уже четыре существенно разных компонента  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{rz}$ , и поле напряжений весьма существенно отличается и от центральносимметричного и от цилиндрически симметричного случаев. На фиг. 8 приводятся экспериментальные точки, соответствующие максимальным значениям напряжений

(значениям непосредственно за фронтом ударной волны в грунте), и прямая, осредняющая эти данные. Значения  $\beta$  на фиг. 8, отмеченные около точек различного начертания, показывают значения угла между осью симметрии и прямой, проходящей через центр взрыва, на которой производилось измерение, результат которого помечен на фиг. 8 точкой соответствующего начертания. Из фиг. 8 видно, что функция пластичности  $F(p)$ , построенная по результатам измерений при контактном

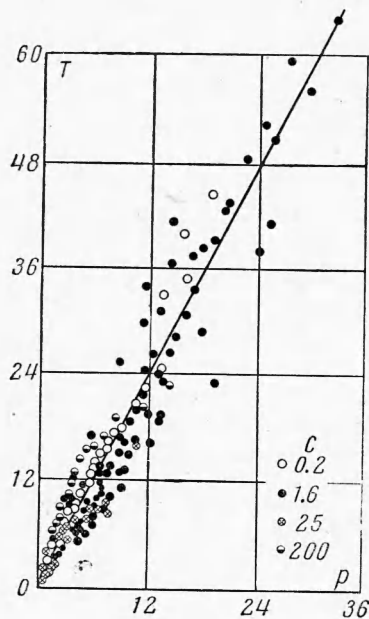
взрыве, совпадает с соответствующей функцией, построенной по результатам измерений при центральносимметричном взрыве. Тем самым результаты по контактному взрыву еще раз показывают, что эта функция универсальна, и, действительно, можно при построении теории пользоваться предположением, что при движениях песчаного грунта с развитыми пластическими деформациями выполняется условие пластичности вида  $I_2 = F(p)$ .

Следует обратить внимание на значительный разброс точек на фиг. 6—8, который связан с отмеченной выше неизбежной грубостью измерений в грунте. Эти данные показывают, что зависимость  $T$  от  $p$  в пределах точности измерений описывается соотношением

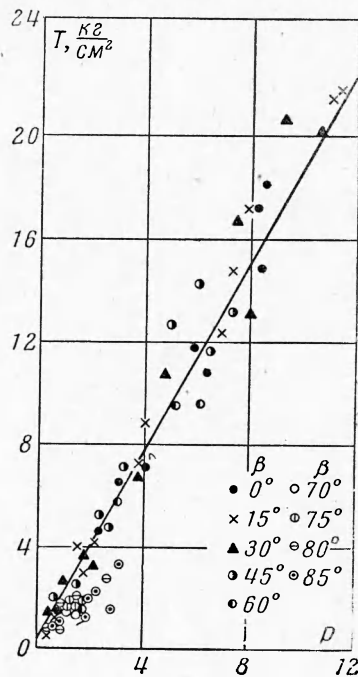
$$T = kp + b, \quad k = 1.8 - 2, \quad b = 0.5 \text{ кг/см}^2 \quad (6)$$

Это соотношение имеет место для изученных песчаных грунтов на двух испытательных площадках, расположенных достаточно далеко одна от другой (под Москвой и Ленинградом), для давлений до  $p \sim 130 \text{ кг/см}^2$ .

Таким образом, считать эти грунты идеальной средой и пренебрегать касательными напряжениями при их движении ни в коем случае нельзя, даже при весьма значительных давлениях, развивающихся при взрыве на расстоянии 5 радиусов заряда. Конечно, при очень больших давлениях (порядка тысяч и десятков тысяч атмосфер) касательные напряжения будут,



Фиг. 7



Фиг. 8

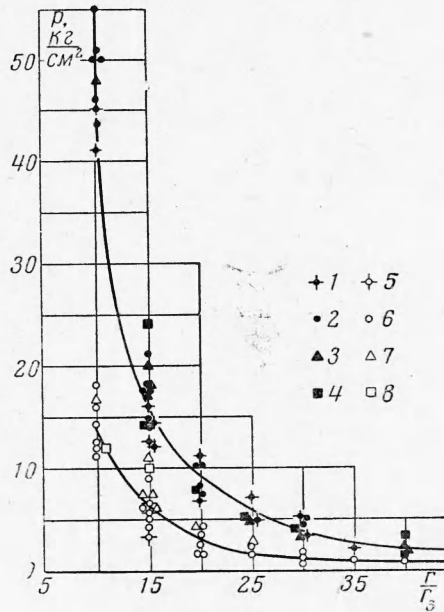
вероятно, ограниченными, и ими можно при теоретическом изучении явления пренебречь. Однако, размеры зоны около очага взрыва, где это имеет место, будут настолько малы, что при решении различных задач для песчаного грунта можно считать, что условие пластичности (6) имеет место всюду в области движения, и это, по-видимому, не приведет к сколько-нибудь заметным ошибкам.

Следует отметить еще один экспериментальный факт качественного характера. Опыты с цилиндрической симметрией показали, что все три главных напряжения  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  существенно различны, т. е. условие так называемой полной пластичности, когда два из главных напряжений совпадают (гипотеза Кармана-Хаара), не выполняется в песчаном грунте.

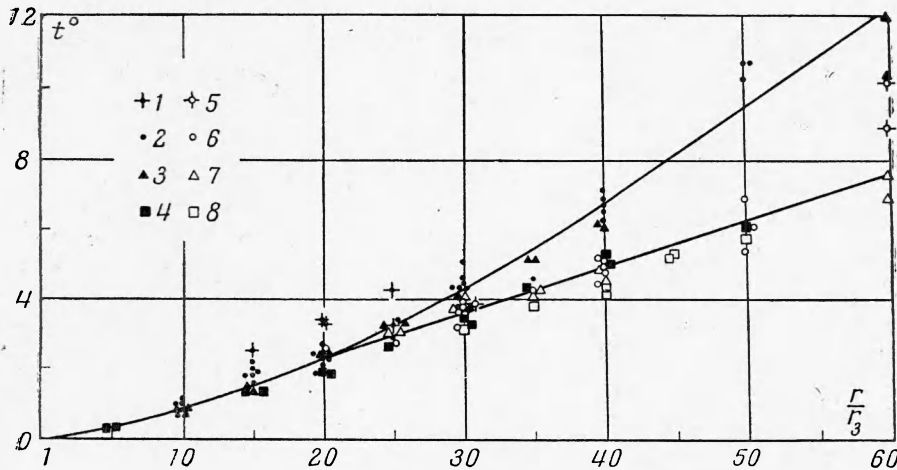
Для иллюстрации того, как затухают напряжения в центральносимметричной взрывной волне в песчаном грунте, приведем экспериментальную зависимость  $-\sigma_{r \max}$  и  $\sigma_{\theta \max}$  от безразмерного расстояния от очага взрыва  $r/r_0$  (фиг. 9). Этот график следует, как было отмечено выше, дополнить точками с абсциссами  $r/r_0 = 5$  и ординатами  $-\sigma_{r \max} = 225 \text{ кг/см}^2$  и  $-\sigma_{\theta \max} = 70 \text{ кг/см}^2$  которые на фиг. 9 невозможно поместить, из-за недостатка места. Из фиг. 9 видно, как быстро затухает волна напряжений. На графике отложены точки, соответствующие взрыву зарядов с весами

0,2, 1,6, 25 и 200 кг, что соответствует изменению характерного размера явления на один порядок (в 10 раз). Видно, что зависимость максимальных напряжений от безразмерного расстояния получается универсальной для такого диапазона масштабов явления. Это же обстоятельство имеет место для графиков на фиг. 6, 7. Аналогично, для того же диапазона зависимость безразмерного пути, пройденного ударной волной, а также звуковой волной, появляющейся на расстоянии 20—25  $r_0$  впереди ударной волны, от безразмерного времени  $t^\circ$  также оказывается универсальной (фиг. 10). Все это свидетельствует о том, что при распространении взрывных волн в обследованных песчаных грунтах имеет место так называемое простое геометрическое подобие. Это означает, что в системе уравнений, которая может быть предложена для описания движений грунта, должны содержаться постоянные параметры, имеющие размерность только давления и плотности. Такого рода свойством обладает система соотношений, предложенная в работах [1, 2].

В процессе подготовки и проведения опытов, а также обсуждения их результа-



Фиг. 9



Фиг. 10

тов существенное участие принимал Н. В. Зволинский, которому, пользуясь представившейся возможностью, приносим глубокую благодарность. В организации проведения части опытов большую помощь оказал В. И. Бибанов, которому авторы также глубоко признательны.

Поступила 7 1 1963

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорян С. С. Об общих уравнениях динамики грунтов. ДАН СССР, 1959, т. 124, №3.
2. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов, ПММ, 1960, т. 24, № 6.
3. 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.