

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ СЖАТИЯ
В СКАЛЬНОМ ГРУНТЕ

Б. Д. Христофоров, А. Н. Ромашов

(Москва)

Параметры волны сжатия в грунте при подземном взрыве определялись по измеренным зависимостям давления от времени в вертикальных скважинах, наполненных водой. Измерения проводились турмалиновыми датчиками с диаметром чувствительного элемента 8 мм. с регистрацией сигналов на установке ПИД-10 [1]. Для измерений были использованы вертикальные цилиндрические скважины глубиной 18—20 м и диаметром 0,15 м, расположенные на расстоянии 10 ÷ 170 м от центра взрыва. По оси каждой из скважин устанавливалось по два датчика давления на расстоянии по вертикали 1—5 м друг от друга и

G, кг	L, м	H, м	h, м	$r/G, \frac{1}{3}$ м/кг ^{1/3}	$p_1, атм$	$\sigma_{r1}, атм$	$V_1, см/сек$	$\dot{V}_1^*, см/сек$	$\tau, мсек$	$\tau^*, мсек$	μ
1000	8	8	17	1,2	65,0	720	420	—	0,75	—	1,26
			14	1,0	77,5	860	480	—	0,75	—	1,32
	20	8	12	2,04	11,3	125	66	64	2,0	1	1,41
			16	2,16	8,5	95	51	—	2,0	—	1,39
	59	12	15	5,9	1,78	20	12,1	16,3	3,2	—	1,23
			18	5,9	1,54	17	11,2	—	1,7	—	1,12
	83	12	18	8,3	0,56	6,2	4,4	—	1,2	—	1,06
			17	8,3	0,72	8,0	5,6	—	1,07	—	1,05
	111	12	18,5	11,1	0,34	3,8	2,5	3,3	3,5	4,1	1,13
	149	20	18	14,9	0,43	4,8	3,4	—	1,3	—	1,04
			17	—	0,47	5,2	3,7	—	1,8	—	1,05
	159	20	18	15,9	0,63	7,0	4,8	4,0	2,8	2,8	1,07
			17	—	0,50	5,6	3,9	—	2,4	—	1,06
	174	6	18	17,4	0,20	2,2	1,55	—	1,65	—	1,04
19			—	0,21	2,3	1,63	—	1,61	—	1,04	
10 000	14	17	16	0,65	102	1130	680	—	0,8	—	1,24
			10	0,73	105	1160	670	—	1,1	—	1,29
	24	17	15	1,12	57	630	380	—	1,2	—	1,21
			18	—	54	600	380	—	1,0	—	1,17
	34	17	18	1,58	27,2	300	180	152	1,8	1,6	1,22
			17	—	32	360	220	—	1,8	—	1,22
	38	17	12	1,78	23	260	160	—	2,0	—	1,22
			16	—	24	270	165	—	2,0	—	1,22
	62	17	18	2,9	10,2	115	71	70	3,0	2	1,20
	66	17	18	3,07	4,8	53	35	—	1,8	—	1,11
	86	17	18	4,0	5,3	59	37	—	3,6	—	1,18

Примечание. L — расстояние от эпицентра взрыва до скважины с датчиком по горизонтали. H и h — глубина заряда и датчика соответственно, σ_1^* и τ^* — параметры, полученные на приборах ВИБ.

2—7 м от дна. На дне каждой скважины были также расположены измерители массовой скорости грунта — приборы ВИБ. Это позволяло проводить сравнение показаний двух типов датчиков. Взрывы проводились зарядами из насыпного тротила весом 1000 и 10000 кг. Грунт представлял собой трещиноватый гранит с плотностью $\rho_{01} = 2,7 \text{ г/см}^3$ и скоростью продольных волн $c_1 = 5 \text{ км/сек}$ на глубине 10—20 м и 2 км/сек у поверхности (см. таблицу).

Некоторые копии типичных осциллограмм давления в скважинах показаны на рис. 1 и 2. Отрицательную фазу волны удавалось зарегистрировать лишь в случае, когда максимальное давление не превышало 1 атм, что соответствует прочности воды на разрыв (см. рис. 1). На рис. 3 приведен график зависимости максимального давления p_1 в фазе сжатия от приведенного расстояния $r/G^{1/3}$ м/кг^{1/3}, которую можно описать эмпирической формулой.

$$p_1 = 63 \left(\frac{G^{1/3}}{r} \right)^2. \quad (1)$$

Разброс показаний датчиков, расположенных в одной скважине, обычно не превышал $\pm 10\%$ в каждом опыте.

Рис. 1. Зависимость давления p от времени t в скважине с водой при взрыве заряда весом 1000 кг на глубине 20 м, $L=159$ м.
1 — $h=18$ м; 2 — $h=19$ м.

Результаты измерения давления в скважинах с водой могут лишь качественно характеризовать параметры волны в грунте при подземном взрыве. Для получения количественных данных необходимо определить зависимость между давлением в воде и нормальным напряжением σ , в грунте.

При крупных взрывах обычно длина волны λ много больше диаметра скважины. В этом случае можно пренебречь явлениями, связанными с преломлением волны в скважину с водой. Поэтому можно предположить, что давление в воде будет определяться ее сжатием в результате статической деформации стенок скважины.

Для оценки деформации стенок скважины рассмотрим решение статической задачи о деформации цилиндрической полости в упругой среде под действием равномерного сжатия нагрузкой — σ , приложенной по двум плоскостям, параллельным оси скважины и расположенным на расстоянии намного большем диаметра скважины.

Деформации, параллельные оси скважины, будем полагать равными 0 ($\epsilon_z = 0$). В этом случае при определении напряженного состояния можно рассмотреть сжатие пластины с отверстием в центре по схеме, показанной на рис. 4, где напряжение — σ , приложенное параллельно оси x , равно ради-

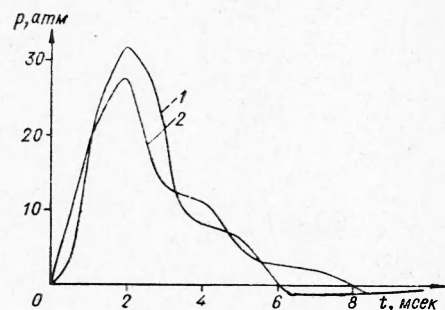
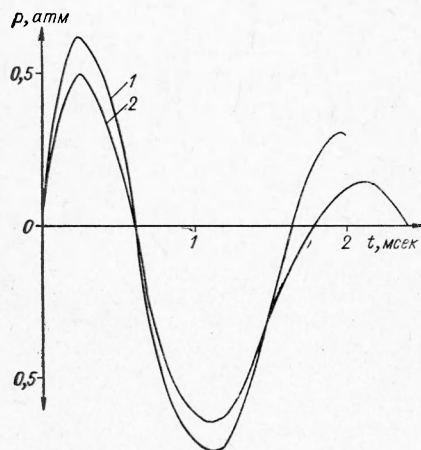


Рис. 2. Зависимость давления p от времени t в скважине с водой при взрыве заряда весом 10 000 кг на глубине 17 м, $L=34$ м.
1 — $h=17$ м; 2 — $h=18$ м.

альному напряжению в волне сжатия, а напряжения $-\frac{\sigma\vartheta}{1-\vartheta}$ — параллельные оси y , введены для того, чтобы на больших расстояниях от отверстия $\varepsilon_y=0$.

В качестве граничных условий задачи используем:

$$1. \sigma_r = 0 \text{ при } r = a, \tag{2}$$

где a — радиус скважины. Так как сжимаемость воды более чем на порядок больше сжимаемости скального грунта, то это условие не вносит большой погрешности.

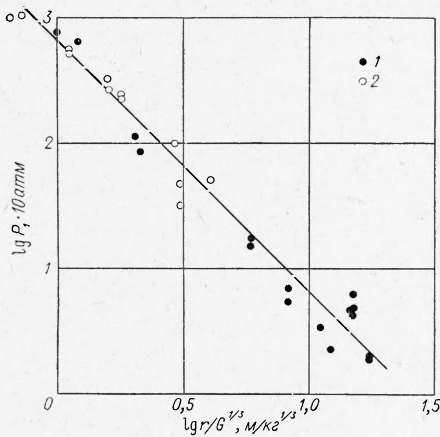


Рис. 3. Зависимость максимального давления p_1 в фазе сжатия от приведенного расстояния $r/G^{1/3}M/Kz^{1/3}$ при подземном взрыве.
1— $G=1000$ кг; 2— $G=10000$ кг.

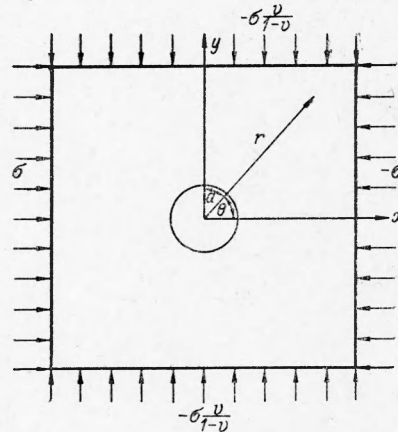


Рис. 4. Схема статического сжатия скважины.

2. На бесконечности решение должно совпадать с решением подобной задачи при отсутствии отверстия. В этом случае в полярных координатах компоненты тензора напряжений и вектора смещений выражаются формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{\sigma}{2(1-\vartheta)} [1 + (1-2\vartheta)\cos 2\theta] \\ \sigma_\theta &= -\frac{\sigma}{2(1-\vartheta)} [1 - (1-2\vartheta)\cos 2\theta] \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

при $r \rightarrow \infty$

$$\left. \begin{aligned} u_r &= -\frac{\sigma}{2E} \frac{(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{(1-\vartheta)} (r + r \cos 2\theta) \\ u_\theta &= -\frac{\sigma}{2E} \frac{(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{1-\vartheta} r \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

где ϑ — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга среды.

Для рассматриваемой задачи решение бигармонического уравнения с функцией напряжения $\psi = f_1(r) + f_2(r)\cos 2\theta$ получено из работы [2], где

$$\left. \begin{aligned} f_1(r) &= a_1 r^2 \ln r + a_2 r^2 + a_3 \ln r + a_4; \\ f_2(r) &= a_6 r^2 + a_8 r^4 + a_7/r + a_8. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

Определяя с помощью граничных условий (2) ÷ (4) значения постоянных в (5), получим выражения для компонент тензора напряжений и деформаций и вектора смещений в среде.

$$\sigma_r = - \frac{\sigma}{2(1-\vartheta)} \left[1 - \frac{a^2}{r^2} + (1-2\vartheta) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right];$$

$$\sigma_\theta = - \frac{\sigma}{2(1-\vartheta)} \left[1 + \frac{a^2}{r^2} - (1-2\vartheta) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_r = & - \frac{\sigma}{2E} \frac{(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{1-\vartheta} \left\{ 1 - \frac{a^2}{(1-2\vartheta)r^2} + \right. \\ & \left. + \left[1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4(1-\vartheta) \frac{a^2}{r^2} \right] \cos 2\theta \right\}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta = & - \frac{\sigma}{2E} \frac{(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{1-\vartheta} \left[1 + \frac{a^2}{(1-2\vartheta)r^2} - \right. \\ & \left. - \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4\vartheta \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_r = & - \frac{\sigma}{2E} \frac{(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{1-\vartheta} \left\{ r + \frac{a^2}{(1-2\vartheta)r^2} + \right. \\ & \left. + \left[r - \frac{a^4}{r^3} + 4(1-\vartheta) \frac{a^2}{r} \right] \cos 2\theta \right\}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$u_\theta = \frac{\sigma}{2E} \frac{(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{1-\vartheta} \left[r + \frac{a^4}{r^3} + 2(1-2\vartheta) \frac{a^2}{r} \right] \sin 2\theta.$$

Площадь деформированного сечения скважины

$$S_1 = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} R^2 d\theta = \pi a^2 \left[1 - \frac{2(1+\vartheta)\sigma}{E} \right],$$

где

$$R^2 = (a + u_r)^2 + u_\theta^2 \approx a^2 \left\{ 1 - \frac{2(1+\vartheta)\sigma}{E} [1 + 2(1-2\vartheta) \cos 2\theta] \right\}.$$

Относительное изменение площади поперечного сечения скважины в результате ее деформации равно

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{S_1 - \pi a^2}{\pi a^2} = -2 \frac{(1+\vartheta)\sigma}{E}.$$

Разлагая в ряд уравнение состояния воды [3], получим

$$\begin{aligned} p = & \frac{\rho_{02} c_2^2}{n} \left[\left(\frac{\rho_0}{\rho_{02}} \right)^n - 1 \right] \approx -\rho_{02} c_2^2 \frac{\Delta V}{V} = \\ = & -\rho_{02} c_2^2 \frac{\Delta S}{S} = \frac{2\rho_{02} c_2^2 (1+\vartheta)\sigma}{E}, \end{aligned} \quad (9)$$

где ρ_{02} , c_2 — начальная плотность и скорость звука в воде соответственно.

$$E = \frac{\rho_{01} c_1^2 (1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{1-\vartheta}.$$

Полагая $\sigma_r = \sigma$ в волне сжатия, получим

$$\sigma_r = p \frac{\rho_{01} c_1^2}{2\rho_{02} c_2^2} \frac{1 - 2\vartheta}{1 - \vartheta} = p \frac{\rho_{01} c_3^2}{\rho_{02} c_2^2}, \quad (10)$$

где c_3 — скорость поперечных волн в грунте.

Для скального грунта при $\rho_{01} = 2,7 \text{ г/см}^3$, $c_1 = 5 \text{ км/сек}$, $\vartheta = 0,22$

$$\sigma_r = 11,1 p. \quad (11)$$

Для проверки полученного из весьма грубых оценок выражения (10) было проведено сравнение результатов пьезоэлектрических измерений с данными приборов ВИБ, регистрировавших массовую скорость грунта V^* . При этом связь между радиальным напряжением и массовой скоростью определялась из закона Гука

$$\sigma_r = \frac{E}{(1 + \vartheta)(1 - 2\vartheta)} \left[(1 - \vartheta) \frac{\partial u_r}{\partial r} + 2\vartheta \frac{u_r}{r} \right], \quad (12)$$

$$V = du_r / dt.$$

Анализ осциллограмм массовой скорости показывает, что с небольшой погрешностью зависимость $V(t)$ может быть представлена в виде

$$V = V_1 \sin \left(2\pi \frac{c_1 t - r}{\lambda(r)} \right), \quad (13)$$

где

$$V_1 = 360 \left(\frac{G^{1/3}}{r} \right)^{1,75}, \quad \lambda(r) = 2,8 (r/G^{1/3})^{0,25} G^{1/3}.$$

Здесь r — расстояние от центра взрыва, m ; G — вес ВВ, $кг$, λ — длина волны, m ; V_1 — максимальная скорость вещества в фазе сжатия, $см/сек$.

При условии $u = 0$ при $c_1 t = r$, смещение грунта в волне

$$u = \int V dt + A = \frac{V_1 \lambda}{2\pi c_1} \left(1 - \cos \pi \frac{c_1 t - r}{\lambda(r)} \right). \quad (14)$$

Подставляя (14) в (12), получим при $\vartheta = 0,22$.

$$V_1 = \frac{\sigma_{r1}}{\rho_{01} c_1 \left(1 + 0,21 \frac{\lambda}{r} \right)}. \quad (15)$$

При $\lambda/r \ll 1$, $V_1 = \sigma_{r1} / \rho_{01} c_1$, как в случае плоской волны. Поправка на сферичность $\mu = (1 + 0,21 \lambda/r)$ определялась в предположении, что $\lambda = 4\tau_1 c_1$, где время нарастания фазы сжатия волны (τ_1) вычислялось из экспериментальных осциллограмм.

В таблице приведены для сравнения значения максимальной массовой скорости V_1^* волны в фазе сжатия по данным приборов ВИБ и рассчитанные из пьезоэлектрических измерений V_1 по формулам (10) и (15). В пределах разброса опытных данных наблюдается удовлетворительное согласие между V_1 и V_1^* . Поэтому связь между p и σ , даваемая

выражением (10), может быть использована для расчета параметров волны сжатия в грунте по данным пьезоэлектрических измерений в наполненных водой скважинах.

Воспользовавшись (10), получим зависимость максимального радиального напряжения в волне сжатия в грунте от расстояния и веса заряда

$$\sigma_{r_1} = 700 \left(\frac{G^{1/3}}{r} \right)^2.$$

Времена нарастания давления в волне сжатия, определенные по осциллограммам давления в воде, оказались примерно такими же, как и времена нарастания массовой скорости, измеренные приборами ВИБ.

Время действия давления положительной фазы волны совпадает с соответствующими данными по массовой скорости лишь на сравнительно близких расстояниях от центра взрыва.

На больших расстояниях время действия волны в скважине меньше соответствующего времени, зарегистрированного приборами ВИБ. Это расхождение связано с влиянием волны разрежения, приходящей от свободной поверхности грунта и снимающей давление в скважине.

Величины максимальных радиальных напряжений в исследованном диапазоне приведенных расстояний находятся в удовлетворительном согласии с ранее опубликованными результатами лабораторных опытов с зарядами малого веса [4, 5]. В этих работах параметры волны напряжения в горной породе определялись по результатам измерения давления в волне, преломленной через плоскую границу раздела в бассейн с водой. При этом должно выполняться условие $d \geq \lambda$, где d — характерный размер водяного бассейна. Ограничения, накладываемые этими условиями, затрудняют использование метода [4, 5] при взрыве зарядов большого веса.

*Поступила в редакцию
10/V 1966*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Соколик, А. И. Станиславский, А. С. Зверев, П. Н. Т.П.О, т. 35 № П59—117/9, 1959.
2. Ван Цзи-Де. Прикладная теория упругости. М., Физматгиз, 1959.
3. Р. Коул. Подводные взрывы. ИЛ, 1950.
4. А. Н. Ханукаев, И. Ф. Ванягин и др. Зап. Лен. горн. ин-та им. Г. В. Плеханова, т. XIV, вып. 1, 1961.
5. А. Н. Ханукаев. Энергия волн напряжения при разрушении горных пород взрывом. М., Госгортехиздат, 1962.