

ПАРАМЕТРЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН
В ВОДОНАСЫЩЕННОЙ СУПЕСИ

И. А. Лучко, П. А. Паршук, А. Г. Смирнов

(Киев)

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров цилиндрических взрывных волн в водонасыщенной супеси в зависимости от глубины заложения заряда и расстояния от него, а также свободной пористости.

Экспериментальные данные о параметрах цилиндрических и сферических взрывных волн в грунтах естественной влажности приведены в [1-4] и сферических волн в водонасыщенных песках в [5,6].

Ниже приведены результаты экспериментального изучения параметров взрывных волн цилиндрических зарядов в водонасыщенной супеси на уровне уреза воды. Необходимость проведения исследования определялась значительным числом технологических задач с применением цилиндрических зарядов ВВ в аналогичных эксперименту грунтовых условиях. Гранулометрический состав грунта приведен ниже. Влажность грунта в условиях естественного водонасыщения 39—41%, объемный вес (плотность) $\rho = 1.92 \text{ г/см}^3$, величина свободной пористости $\alpha_1 = 2.5 \cdot 10^{-2}$

δ , мм	0.5—0.25	0.25—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	менее 0.005
n , %	46.5	21.32	23.7	4.58	3.9

Вес 1 м горизонтальных цилиндрических зарядов тротила C и глубина их заложения H при длине зарядов 5 м приведены ниже

C , кг/м	4.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
H , м	0.80	0.93	0.56	0.45	0.20	0.35	0.55	0.70

Вес 1 м длины вертикальных цилиндрических зарядов 0.55, 1.0, 1.4 кг при длине каждого заряда 3 м.

Измерение параметров взрывных волн осуществлялось по методике [2,4] с помощью тензометрических датчиков с усилением сигнала усилителем 8 АНЧ и записью на реконструированный осциллограф Н-700 [1].

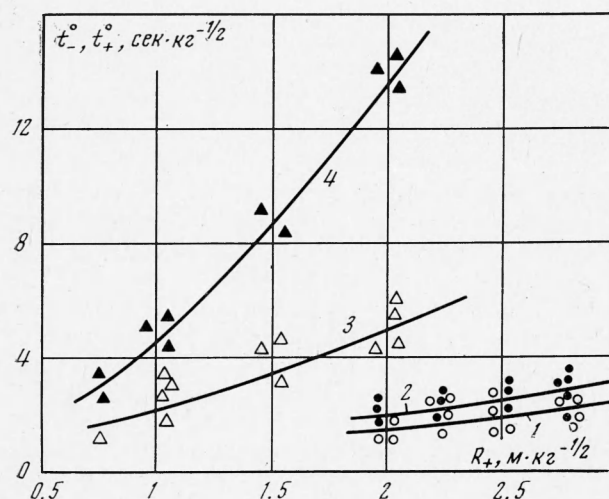
Датчики устанавливались в грунт на расчетных удалениях от взрыва в специально пробуренные скважины диаметром 45 мм, после чего скважины послойно засыпались вынутым из скважины грунтом. Разжиженный грунт в результате последующей консолидации обеспечивал непрерывный контакт массива и мембраны датчика. С целью гидроизоляции измерительного и токопроводящих элементов корпус датчика заполнялся трансформаторным маслом. Непосредственно перед установкой в скважину заполненные маслом датчики тарировались статически с помощью гидравлического пресса.

При регистрации взрывных волн горизонтального цилиндрического заряда датчики устанавливались на глубине заложения заряда по перпендикуляру к его середине, вертикального цилиндрического заряда — также по перпендикуляру к нему на глубине, соответствующей середине заряда.

Обработка экспериментальных данных проводилась с учетом геометрического подобия, согласно которому подобные времена, глубины и расстояния выбираются в виде

$$(1) \quad t_-^{\circ} = \frac{10^3 t_-}{\sqrt{C}}, \quad t_+^{\circ} = \frac{10^3 t_+}{\sqrt{C}}, \quad H_+ = \frac{H}{\sqrt{C}}, \quad R_+ = \frac{R}{\sqrt{C}}$$

где t_- , t_+ — время в *мсек* прихода возмущения и достижения максимума напряжения в данной точке; R — расстояние в *м* от заряда до точки измерения.



Фиг. 1

В дальнейшем все экспериментальные зависимости построены в соответствующих координатах, учитывающих масштабность явления, при обработке экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Ранее экспериментально показано [6], что при полном водонасыщении грунта взрывная волна в нем на любых расстояниях от взрыва носит ударный характер, т. е. при подходе фронта волны в данную точку массива давление на ее фронте мгновенно возрастает до конечной величины $\sigma = \sigma_+$, а затем убывает по закону, близкому к экспоненциальному.

В грунте такого физического состояния при взрыве заряда цилиндрической симметрии в безграничной среде затухание интенсивности напряжений на фронте с расстоянием происходит только в силу геометрического расхождения фронта без потерь на пластическое деформирование. Любое отклонение характера затухания волны от указанного, равно как и распад фронта взрывной волны, т. е. наличие разницы в скорости распространения фронта волны и максимума напряжений, свидетельствует о потерях энергии на пластическое деформирование грунта.

Экспериментально установлено, что даже при незначительном наличии в грунте свободной пористости (менее 2% объема) на определенных расстояниях от заряда ВВ происходит отрыв фронта упругих возмущений от фронта максимальных напряжений, т. е. взрывная волна перестает быть ударной. На фиг. 1 приведены экспериментальные зависимости, характеризующие время прихода в данную точку массива фронта упругого возмущения (кривая 1), максимум напряжений (кривая 2) в водонасыщенной

супеси и аналогичные показатели в суглинке (соответственно кривые 3 и 4) ненарушенной структуры плотностью 1.96 г/см^3 и объемной влажностью 14% при взрыве вертикального цилиндрического заряда. Математически эти зависимости описываются степенной функцией вида

$$(2) \quad t_-, t_+ = a_i R_-^{b_i}$$

Значения коэффициентов a_i и показателей степени b_i приведены ниже.

Водонасыщенная супесь							
a_1	a_2	a_5	a_6	b_1	b_2	b_5	b_6
1.15	1.15	1.16	1.24	1.0	1.12	1.0	1.1

Суглинок естественной влажности							
a_3	a_4	a_7	a_8	b_3	b_4	b_7	b_8
2.59	4.74	3.06	4.54	1	1.58	1	1.19

Цифровые индексы при коэффициентах и показателях степени соответствуют номеру кривой на фиг. 1. Индексы 5—8 относятся к горизонтальным цилиндрическим зарядам (5, 6 — водонасыщенная супесь; 7, 8 — суглинок).

Как следует из приведенных данных и фиг. 1, наряду с видимым распадом фронта взрывной волны для рассматриваемых типов грунтов отмечается также значительная разница в абсолютных значениях величин t_- и t_+ в связи с разным содержанием в грунтах влаги при ориентировочно равной плотности.

Скорость распространения упругого фронта (D_-) и максимума напряжений (D_+) цилиндрической взрывной волны для обоих типов грунтов и функции относительного расстояния R_+ удовлетворительно описывается общим уравнением вида

$$(3) \quad D_-, D_+ = m_i R_+^{n_i}$$

Численные значения коэффициентов m_i и показателя степени n_i приведены ниже. Индексы, обозначающие грунт и тип заряда, аналогичны принятым выше.

Таким образом, в приведенном на графиках диапазоне относительных расстояний от взрыва независимо от типа грунта и степени его водонасыщенности фронт взрывной волны и максимум напряжений

Водонасыщенная супесь							
m_1	m_2	m_5	m_6	n_1	n_2	n_5	n_6
870	850	265	730	0	0.12	0	0.1

Суглинок естественной влажности							
m_3	m_4	m_7	m_8	n_3	n_4	n_7	n_8
386	193	340	185	0	0.58	0	0.19

распространяются с различными скоростями. Вместе с тем экспериментально доказано, что на достаточно близких к цилиндрическому заряду относительных расстояниях ($R_+ < 0.1$) независимо от свободной пористости материала в нем распространяется взрывная волна с ударным фронтом [7]. Расстояния, на которых происходит распад фронта, уменьшаются с увеличением свободной пористости и увеличиваются с ростом степени водонасыщения грунта.

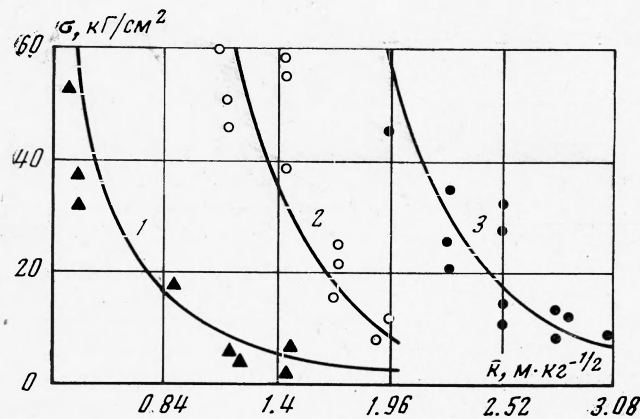
На фиг. 2 приведены зависимости изменения нормальных радиальных σ_+ напряжений на фронте взрывной волны от относительного расстояния при взрыве вертикального (кривая 3) и горизонтального (кривая 2) зарядов в водонасыщенном грунте и вертикального цилиндрического заряда в сравнимом суглинке (кривая 1). Закон затухания напряжений цилиндрических взрывных волн описывается уравнением вида

$$(4) \quad \sigma_+ = k_i R_+^{-\mu_i}$$

Численные значения коэффициентов k_i и показателей степени μ_i приведены ниже. Индексы соответствуют номерам кривых на фиг. 2.

k_1	k_2	k_3	μ_1	μ_2	μ_3
9.75	1440	114.8	2.17	4.8	3.76

Как следует из фиг. 2, затухание взрывной волны от горизонтального цилиндрического заряда с расстоянием для одного типа грунта является



Фиг. 2

более интенсивным, чем вертикального цилиндрического. Это объясняется влиянием свободной поверхности, выражающимся в том, что с уменьшением глубины заложения заряда относительно свободной поверхности интенсивность напряжений на фронте на равных относительных расстояниях от взрыва уменьшается.

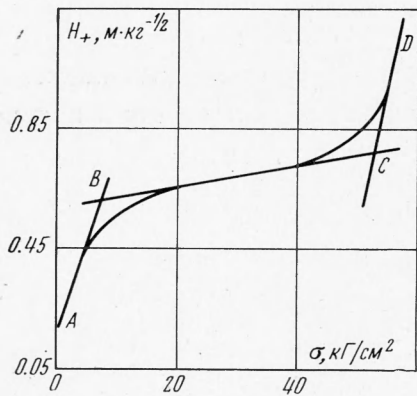
На фиг. 3 приведено изменение напряжений на фронте волны на определенном расстоянии от взрыва ($R_+ = 1.96$) горизонтальных цилиндрических зарядов, размещенных на разной глубине в водонасыщенном грунте. Видно, что с ростом относительной глубины в пределах $H_+ < 0.45$ напряжения увеличиваются незначительно; в интервале $0.45 \leq H_+ \leq 0.75$ наблюдается интенсивный рост максимальных напряжений на фронте волны; при $H_+ > 0.75$ имеет место прежняя зависимость, т. е. дальнейшее увеличение глубины заложения заряда сопровождается незначительным ростом напряжений и в пределе они стремятся к определенной величине, характерной для данного типа грунта, его начальных физических констант и относительного расстояния от взрыва.

Глубина $H_+ = 0.75$ является минимальной глубиной заложения горизонтального цилиндрического заряда ВВ, характеризующей оптимальный режим реализации энергии заряда во взрывную волну.

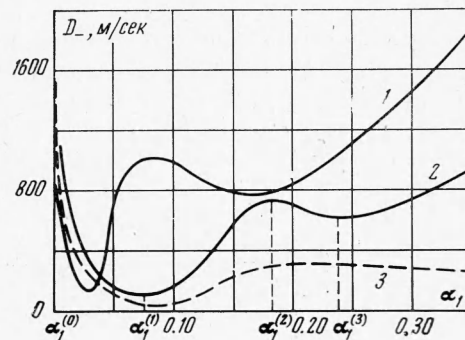
Вертикальные цилиндрические заряды достаточной длины при взрыве в грунте по условию камуфлетности близка к горизонтальным цилиндри-

ческим зарядам, располагаемым на глубине $H_+ = 0.75$. Поэтому интенсивность затухания взрывных волн таких зарядов в грунтах одного типа примерно одинакова. При меньшей глубине заложения относительно свободной поверхности интенсивность взрывных волн горизонтальных цилиндрических зарядов на равных относительных расстояниях ниже, чем вертикальных цилиндрических.

Из сопоставления кривых 1 и 3 (фиг. 2) следует, что при различных содержании влаги и характере структурных связей в грунте на порядок и более изменяется величина максимальных напряжений на фронте взрывной волны на одинаковых относительных расстояниях от взрыва.



Фиг. 3



Фиг. 4

Закон затухания интенсивности взрывной волны является функцией затрат энергии на объемное деформирование данного типа грунта. На фронте взрывной волны осуществляется локальное микродеформирование грунта, выражающееся в сжатии заполненных воздухом свободных пор, разрушении жестких цементационных связей и силового поля взаимодействия водных пленок. Поэтому потери энергии на фронте взрывной волны и закон затухания их интенсивности зависят от степени сжимаемости грунта, т. е. от того, насколько развиты в нем перечисленные виды структурных связей.

Последнее для конкретного типа грунта определяется главным образом степенью водонасыщенности или величиной его свободной пористости.

На фиг. 4 приведено изменение скорости распространения фронта взрывной волны (D_-) умеренной интенсивности при различной свободной пористости (α_1) в супеси (кривая 3). Для сравнения показаны аналогичные зависимости в суглинке (кривая 1) и песке (кривая 2), построенные по данным [5,8,9]. На участке $\alpha_1^{(0)} - \alpha_1^{(1)}$ скорость распространения фронта резко снижается в связи с развитием свободной пористости и увеличением сжимаемости супеси. В интервале изменения свободной пористости от $\alpha_1^{(1)}$ до $\alpha_1^{(2)}$ сжимаемость супеси уменьшается за счет появления эффекта капиллярного упрочения, скорость распространения фронта увеличивается.

Уменьшение D_- после достижения супесью свободной пористости $\alpha_1 = \alpha_1^{(2)}$ связано с сокращением менисков влаги и снижением сил капиллярного натяжения. Характер изменения D_- при свободной пористости $\alpha_1 > \alpha_1^{(3)}$ определяется развитием в супеси жестких цементационных связей и уменьшением сжимаемости.

В тяжелых супесях увеличивается процентное содержание тонкодисперсных фракций и снижается роль капиллярных сил, поэтому для них характер зависимости $D_- = D_-(\alpha_1)$ качественно соответствует кривой 1 на фиг. 4. В легких супесях цементационные связи при свободной пористости $\alpha_1 > \alpha_1^{(3)}$ малоразвиты и скорость распространения фронта подобна аналогичной зависимости для песка (кривая 2).

Поступила 30 VII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовк А. А., Черный Г. И., Смирнов А. Г. Деформирование сжимаемых сред при динамических нагрузках. Киев, «Наукова думка», 1971.
2. Вовк А. А., Кононенко В. И., Лучко И. А., Плаксий В. А. Исследование параметров ударных волн при взрывах цилиндрических горизонтальных зарядов в суглинке. ПМТФ, 1969, № 3.
3. Ляхов Г. И., Нарожная З. В. Экспериментальные исследования взрывных волн в глинистом грунте. ПМТФ, 1961, № 2.
4. Григорян С. С., Ляхов Г. М., Мельников В. В., Рыков Г. В. Взрывные волны в лесовидном грунте. ПМТФ, 1963, № 4.
5. Ляхов Г. М., Полякова Н. И. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. М., «Недра», 1966.
6. Ляхов Г. М. Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. М., «Недра», 1964.
7. Христоворов Б. Д. Параметры ударных волн при взрыве сферического заряда в пористом NaCl. Физика горения и взрыва, 1971, т. 7, № 4.
8. Лысенко М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. М., «Недра», 1972.
9. Гримма Ю. И. Некоторые результаты экспериментальных исследований по определению скорости распространения продольных волн в образцах грунта. Сб. Динамика грунтов, № 44. М., Госстройиздат, 1961.