

учет переменной уплотнения на фронте волны разрушения приводит к существенному увеличению как полной упругой энергии, так и энергии, уходящей на бесконечность.

На фиг. 4 представлена зависимость от начального уплотнения величины  $d = e(\lambda = 1)/e(\lambda = 0)$ , т. е. отношения энергии, излученной на бесконечность при  $\lambda = 1$ , к этой же энергии, рассчитанной при  $\lambda = 0$ . Видно, что для среды с  $\epsilon_0$  порядка 10% (а  $\epsilon_0$  совпадает с начальной пористостью среды) эффект увеличения  $e$  наиболее существен.

Приведенное в работе рассмотрение показывает, что учет переменной уплотнения среды на фронте волны разрушения дает существенное изменение характеристик упругого сигнала камуфлетного взрыва.

Авторы благодарят О. В. Нагорнова за полезные замечания и обсуждения.

Поступила 11 X 1982

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Механический эффект подземного взрыва/Под ред. М. А. Садовского. М.: Недра, 1971.
2. Багдасарян А. Б. Расчет действия взрыва в хрупкой горной породе (разрушение раздавливанием, образованием трещин скола и отрыва).— ПМТФ, 1970, № 5.
3. Душин С. З., Нагорнов О. В., Понов Е. А. Излучение упругих волн при камуфлетном взрыве.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1982, № 2.
4. Николаевский В. Н., Басинев К. С., Горбунов А. Г., Зотов Г. А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970.
5. Душин С. З., Спроткин В. К. Распирение газовой полости в хрупкой породе с учетом дилатанционных свойств грунта.— ПМТФ, 1977, № 4.

УДК 624.131 + 551.345

### ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Г. М. Ляхов, Г. Б. Фраш

(Москва)

Приводятся результаты экспериментальных исследований сферических взрывных волн в сезонно-мерзлых грунтах с разными физико-механическими характеристиками при разной температуре. Из сопоставления с результатами исследований [1,2] следует, что параметры волны существенно зависят от характеристик грунта в исходном немерзлом состоянии и от температуры. При понижении температуры максимальные напряжения и скорость распространения волны возрастают, а ее длительность убывает.

Общий характер угасания и размывания волн в мерзлых грунтах, так же как и в немерзлых, соответствует средам, обладающим пластическими свойствами и объемной вязкостью [2].

**1. Характеристики грунтов и условия проведения опытов.** Мерзлые грунты являются четырехкомпонентными средами, включающими твердые минеральные частицы, образующие скелет, незамерзшую воду, лед и воздух. Обозначим через  $\alpha_1$  объем воздуха (свободного порового пространства),  $\alpha_2$  — воды,  $\alpha_3$  — минеральных частиц,  $\alpha_4$  — льда, в единице объема грунта ( $\alpha_4$  называют также объемной льдистостью);  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  — плотность материала соответствующих компонентов. Эти величины связаны с плотностью грунта  $\rho_0$ , массовой (весовой) влажностью  $w$ , массовой льдистостью  $i$  уравнениями

$$(1.1) \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1, \quad \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \alpha_3 \rho_3 + \alpha_4 \rho_4 = \rho_0, \\ \alpha_4 \rho_4 / (\alpha_2 \rho_2 + \alpha_4 \rho_4) = i, \quad (\alpha_2 \rho_2 + \alpha_4 \rho_4) / \alpha_3 \rho_3 = w.$$

При понижении температуры объемное содержание компонентов меняется. Это происходит за счет возможной миграции воды к фронту промерзания из нижележащих слоев грунта, а также за счет постепенного замерзания поровой воды [3, 4]. Поэтому значения приведенных выше ве-

Таблица 1

Размер частиц, мм	Содержание фракций, %
0,5	5
0,5—0,25	16
0,25—0,1	21,4
0,1	57,6

Таблица 2

Размер частиц, мм	Содержание фракций, %
0,1—0,05	24
0,05—0,01	52
0,01—0,005	12
0,005	12

личин должны соответствовать температуре, при которой проводятся опыты, а также исходному (атмосферному) давлению.

Эксперименты проводились в песчаном и суглинистом грунтах естественного сложения в условиях сезонного промерзания до глубины 0,45—0,5 м. Гранулометрический состав песчаного грунта приведен в табл. 1.

При температуре грунта  $t = -0,2^\circ\text{C}$  средние значения характеристик грунта составляли:  $\rho_0 = 1840 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_3 = 2660 \text{ кг/м}^3$ ,  $w = 0,27$ ,  $i = 0,73$ .

Гранулометрический состав суглинистого грунта приведен в табл. 2.

По гранулометрическому составу грунт относится к пылевидным суглинкам, близким к супеси. При температуре  $-0,2^\circ\text{C}$  и  $-0,4^\circ\text{C}$  средние значения характеристик составляли:  $\rho_0 = 1920 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_3 = 2680 \text{ кг/м}^3$ ,  $w = 0,22$  в обоих случаях, а льдистость  $i = 0,5$  и  $0,75$  соответственно.

Принимая плотность компонентов  $\rho_1 = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_4 = 910 \text{ кг/м}^3$ , в соответствии с уравнениями (1.1) найдем объемное содержание компонентов (табл. 3).

В незамерзшем состоянии грунты с таким содержанием компонентов являются водонасыщенными — газ содержится в виде пузырьков, изолированных от атмосферы. С уменьшением  $\alpha_1$  сжимаемость водонасыщенных немерзлых грунтов существенно уменьшается [2].

Измерения напряжения проводились пьезокерамическими датчиками с частотой собственных колебаний  $\omega = 40\,000 \text{ Гц}$  и записью сигналов на электронных осциллографах, а также мембранными датчиками с  $\omega = 4000 \text{ Гц}$  и записью на шлейфных осциллографах.

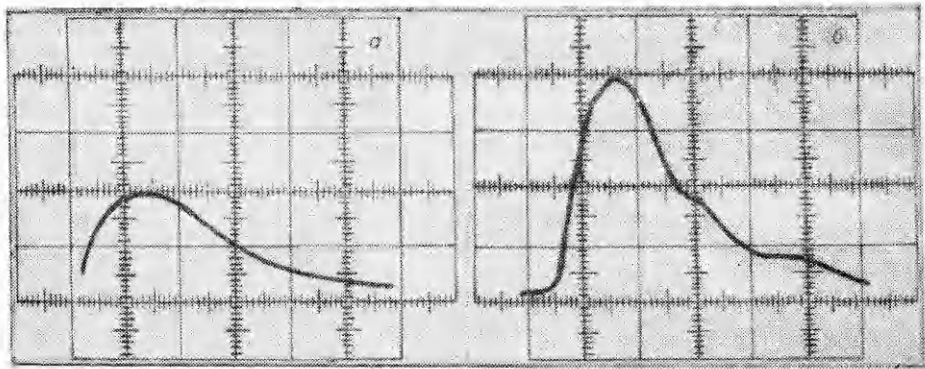
Датчики и заряд ВВ устанавливались на одной глубине в скважины, пробуренные в мерзлом грунте. После установки скважины заполнялись вынутым грунтом и трамбовались. Опыты ставились после смерзания грунта. Волны создавались при взрывах сосредоточенных зарядов ВВ массой 0,1 кг. Глубина установки датчиков  $h$  в песчаном грунте составляла 0,4 м при  $t = -0,2^\circ\text{C}$ , в суглинистом грунте  $h = 0,2$  при  $t = -0,4^\circ\text{C}$ ,  $h = 0,35$  м при  $t = -0,2^\circ\text{C}$  и  $h = 0,45$  при температуре, близкой к нулю. Последняя глубина соответствовала примерно границе промерзания. На каждом расстоянии измерялись радиальный  $\sigma_r$  и тангенциальный  $\sigma_\theta$  компоненты напряжения. Применялся аммонит № 6 ЖВ, плотность  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

**2. Результаты опытов.** Введем относительное расстояние  $R = r/r_0$ , где  $r$  — расстояние от центра взрыва,  $r_0$  — радиус заряда ВВ. Датчики ставились на расстояниях  $R$  от 10 до 35.

На фиг. 1, а, б представлены образцы записи напряжения в мерзлом песчаном грунте при  $R = 13$  и 20. Максимальные напряжения при этом составляли 8 и 3,5 МПа. Расстояние между двумя соседними вертикальными линиями на осциллограммах (масштаб времени) — 100 и 500 мкс соответственно.

Таблица 3

Грунт	$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
Песчаный	-0,2	0,037	0,105	0,545	0,313
Суглинистый	-0,2	0,048	0,192	0,585	0,175
«	-0,4	0,038	0,087	0,586	0,289

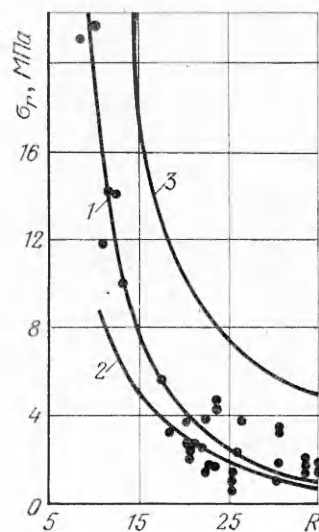


Ф и г. 1

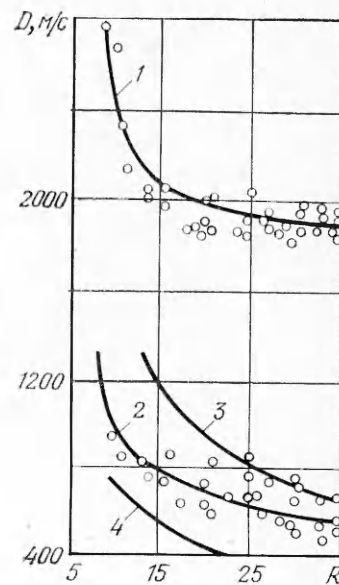
Из приведенных, а также остальных осциллограмм следует, что взрывная волна на исследованных расстояниях  $10 \leq R \leq 35$ , что соответствует максимальным значениям  $\sigma_r < 20$  МПа, не является ударной. Нарастание напряжения до максимального значения происходит постепенно. При движении время нарастания напряжения до максимума  $\tau$  и общая длительность волны  $\theta$  возрастают. Рост  $\tau$  и  $\theta$  происходит примерно по линейному закону. При этом на расстоянии  $R = 10$  имеем  $\tau = 0,1$  мс,  $\theta = 0,5$  мс, а при  $R = 35$  —  $\tau = 1$  мс,  $\theta = 2,5$  мс. При определении  $\tau$  и  $\theta$  учитываются промежутки времени, когда  $\sigma_r$  составляет не менее  $0,02$ — $0,03$  максимального на этом расстоянии значения напряжения.

На фиг. 2 кривая 1 с экспериментальными точками соответствует максимальным значениям радиального напряжения в мерзлом песчаном грунте  $\sigma_r = \sigma_r(R)$ . Кривые 2 и 3 без экспериментальных точек заимствованы из [2]. Они определяют максимальное напряжение  $\sigma_r(R)$  в немерзлом песчаном водонасыщенном грунте естественного сложения с содержанием компонентов  $\alpha_1 = 0,03$ — $0,04$ ,  $\alpha_2 = 0,36$ — $0,37$ ,  $\alpha_3 = 0,6$  и  $\alpha_1 = 0,008$ — $0,012$ ,  $\alpha_2 = 0,388$ — $0,392$ ,  $\alpha_3 = 0,6$  соответственно при камуфлегных взрывах.

На фиг. 3 кривая 1 соответствует зависимости от расстояния скорости фронта волны  $D_f(R)$ . Под скоростью фронта понимается скорость распро-



Ф и г. 2



Ф и г. 3

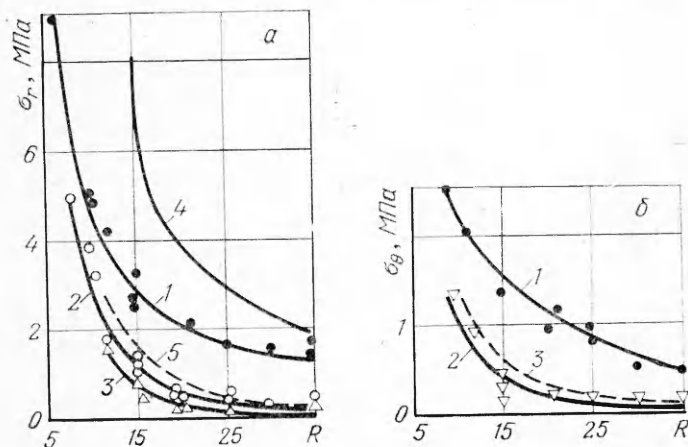
странения состояния в волне с напряжением  $\sigma_r$ , равным 0,02—0,03 максимального значения. Кривая 2 соответствует скорости распространения максимального напряжения в волне  $D_m(R)$ . Обе кривые относятся к песчаному грунту с температурой  $t = -0,2^\circ\text{C}$ . Кривые 4 и 3 определяют скорость распространения максимума напряжения в немерзлом песчаном водонасыщенном грунте при  $\alpha_1 = 0,03 - 0,04$  и  $\alpha_2 = 0,008 - 0,012$  соответственно [2].

Сопоставление кривых на фиг. 2 и 3 показывает, что при температуре  $t = -0,2^\circ\text{C}$  максимальные напряжения  $\sigma_r(R)$  и скорость их распространения  $D_m(R)$  превышают их значения в немерзлом грунте примерно такой же плотности и примерно с таким же содержанием заземленного воздуха. При  $\alpha_1 = 0,01$  напряжение  $\sigma_r(R)$  и скорость  $D_m(R)$  в немерзлом грунте существенно выше, чем в мерзлом при  $\alpha_1 = 0,035$ . Таким образом, цементация минеральных частиц льдом при  $t = -0,2^\circ\text{C}$  и обусловливаемое ею уменьшение сжимаемости грунта приводят к меньшему изменению параметров волны, чем уменьшение сжимаемости, вызываемое сокращением содержания заземленного воздуха до 0,01 без понижения температуры. Отметим, что в мерзлом грунте взрывы не были камуфлетными, что может снижать значения напряжения и скорости.

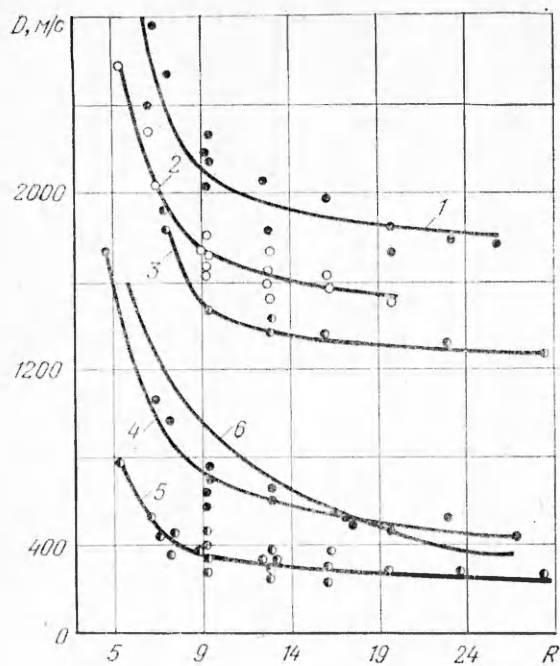
На фиг. 4, а, б представлены графики зависимости максимальных радиальных и тангенциальных напряжений от расстояния в суглинистом грунте. Кривые 1—3 на фиг. 4, а относятся к температуре  $-0,4$ ;  $-0,2$  и  $0^\circ\text{C}$  соответственно. Кривые тангенциальных напряжений 1 и 2 на фиг. 4, б соответствуют  $t = -0,4$  и  $-0,2^\circ\text{C}$ . При  $t = 0^\circ\text{C}$  кривая не приведена, она проходит на 15—20% ниже кривой 2. Сопоставление показывает, что понижение температуры мерзлого грунта приводит к возрастанию радиальных и тангенциальных напряжений. При изменении температуры от 0 до  $-0,2^\circ\text{C}$  напряжение в рассмотренном интервале расстояний возрастает на 20—50%, а от  $-0,2$  до  $-0,4^\circ\text{C}$  существенно больше (в 4—5 раз). Это связано с тем, что цементация твердых частиц льдом возрастает с понижением температуры более интенсивно, чем по линейному закону.

Кривая 4 на фиг. 4, а, заимствованная из работы [2], соответствует радиальным напряжениям при взрыве в глинистом немерзлом грунте с  $\rho_0 = 2000-2100 \text{ кг/м}^3$  и содержанием газообразного компонента  $\alpha_1 = 0,02-0,03$ . Сопоставление кривых 1 и 4 показывает, что понижение температуры от 0 до  $-0,4^\circ\text{C}$  и связанная с этим цементация частиц льдом оказывает меньшее влияние на сжимаемость грунта и вызванное этим изменение параметров взрывных волн, чем понижение содержания заземленного воздуха от 0,048 до 0,02—0,03 при положительной температуре.

На фиг. 4, а кривая 5, а на фиг. 4, б кривая 3 (без экспериментальных точек) определяют радиальные и тангенциальные максимальные напряжения волны в суглинистом сезонно-мерзлом грунте с граиулометриче-



Ф и г. 4



Ф и г. 5

ским составом, близким к рассматриваемому грунту (опыты [1]). Содержание компонентов:  $\alpha_1 = 0,14$ ,  $\alpha_2 = 0,25$ ,  $\alpha_3 = 0,61$ ,  $\rho_0 = 1870 \text{ кг/м}^3$ . Грунт с такими характеристиками в немерзлом состоянии является неводонасыщенным. Масса зарядов ВВ составляла 0,025–0,075 кг, заглубление заряда и датчиков 0,25–0,30 м, температура грунта  $-3^\circ\text{C}$ . Сопоставление кривых 1 и 5 на фиг. 4, а и 1 и 3 на фиг. 4, б показывает, что в неводонасыщенном грунте при  $t = -3^\circ\text{C}$  максимальные напряжения существенно меньше, чем в водонасыщенном грунте при  $t = -0,4^\circ\text{C}$ . Цементация минеральных частиц неводонасыщенного грунта льдом приводит к меньшему изменению параметров волны,

чем повышении влажности до водонасыщенного состояния при существенно меньшем понижении температуры.

Тангенциальные напряжения в мерзлом грунте (фиг. 4, а, б) заметно меньше нормальных, как и в немерзлых грунтах.

На фиг. 5 приведены графики 1–3 скорости распространения фронта волны  $D_f$  и 4, 5 максимума напряжения  $D_m$  в мерзлом суглинистом грунте. При этом графики 1–3 относятся к температуре  $-0,4$ ,  $-0,2$  и  $0^\circ\text{C}$ , а 4, 5 — к температуре  $-0,4$  и  $-0,2^\circ\text{C}$  соответственно. Понижение температуры приводит к возрастанию  $D_f$  и  $D_m$ . Вблизи от заряда ВВ, как и в немерзлых грунтах, наблюдается быстрое падение  $D_f$  и  $D_m$  с расстоянием, на большом удалении обе скорости убывают существенно медленнее. График 6 соответствует скорости распространения максимума напряжения в немерзлом водонасыщенном глинистом грунте с  $\rho_0 = 2000\text{--}2100 \text{ кг/м}^3$  и  $\alpha_1 = 0,02\text{--}0,03$  (данные [2]). Скорость  $D_m$  в грунте с  $\alpha_1 = 0,048$  при  $t = -0,4^\circ\text{C}$  существенно меньше, чем в немерзлом грунте при  $\alpha_1 = 0,02\text{--}0,03$ .

Обозначим через  $\theta$  длительность действия волны. Введем относительное время действия  $\theta^0 = \theta / \sqrt[3]{Q}$ , где  $Q$  — масса заряда ВВ. Экспериментальные значения  $\theta^0 \cdot 10^3$  для двух расстояний приведены ниже. Для сопоставления даны также результаты определения  $\theta^0 \cdot 10^3$  в мерзлых неводонасыщенных суглинках при  $t = -3^\circ\text{C}$ , взятые из работы [1] (табл. 4).

Изменение  $\theta^0$  с расстоянием происходит во всех случаях примерно по линейному закону.

Таким образом, сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами ранее проведенных исследований показывает, что динамические свойства мерзлых грунтов существенно зависят от гранулометрического состава, содержания компонентов в исходном немерзлом состоянии и от температуры. В мерзлых водонасыщенных грунтах напряжение и скорость распространения волн больше, а дли-

Т а б л и ц а 4

Грунт	$t, ^\circ\text{C}$	$R=10$	$R=30$
Песчаный	$-0,2$	2	4,5
Суглинистый	$-0,2$	2,7	4,7
»	$-0,4$	1,8	3,2
»	$-3$	19	23

тельность волны меньше, чем в мерзлых неводонасыщенных грунтах.

С понижением температуры мерзлых грунтов уменьшается количество незамерзшей воды в порах, возрастает цементация твердых частиц льдом, что приводит к уменьшению сжимаемости среды. Напряжение и скорость распространения волны при этом растут, а длительность ее действия уменьшается.

Понижение температуры мерзлых грунтов, как показывают опыты [4—6], приводит к возрастанию скорости распространения продольных волн. Таким образом, характер изменения скорости взрывных волн конечной амплитуды и продольных волн при промерзании грунта одинаковый.

Опыты [7] показывают, что объемные деформации мерзлых грунтов существенно зависят от скорости нагружения  $\dot{\sigma}$ . В средах с такими свойствами взрывные волны размываются, превращаясь из ударных в непрерывные волны сжатия [2]. Зависимость деформации от  $\dot{\sigma}$  показывает, что наблюдающееся в опытах размывание взрывных волн связано с объемной вязкостью.

Проведенные опыты подтверждают, что основные закономерности угасания волн в мерзлых и немерзлых грунтах имеют общий характер:

— интенсивность угасания амплитуды волны (максимального напряжения) и скорости ее распространения с расстоянием зависит от содержания компонентов, с увеличением влажности интенсивность угасания уменьшается;

— скорость фронта волны (видимого) с удалением от места взрыва уменьшается медленнее, чем скорость максимума напряжения;

— длительность нарастания напряжения до максимума и общая длительность волны при ее распространении увеличиваются, происходит размывание волны;

— нормальные и тангенциальные напряжения существенно различны;

— после прохождения волны в грунте сохраняются остаточные деформации. Все эти закономерности свойственны также немерзлым грунтам.

Мерзлые грунты, как и немерзлые, следует рассматривать как многокомпонентные твердые среды, обладающие пластическими свойствами и объемной вязкостью. Отличие от немерзлых грунтов в количественном проявлении этих свойств и в зависимости определяющих физико-механических характеристик от температуры.

*Поступила 26 X 1982*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Труханов Ю. Я. Экспериментальное исследование полей напряжения и скорости частиц при взрыве в мерзлом грунте. — ФГВ, 1967, № 1.
2. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974.
3. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. школа, 1973.
4. Дроговской Н. З. Разрушение мерзлых грунтов взрывом. М.: Недра, 1981.
5. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. М.: Недра, 1976.
6. Зарубин Н. Е., Джурик В. П. Сейсмические свойства мерзлых грунтов Прибайкалья. — Основания, фундаменты и механика грунтов, 1975, № 3.
7. Вовк А. А., Михалюк А. В. и др. Механические свойства мерзлых грунтов при динамическом нагружении. — Основания, фундаменты и механика грунтов, 1980, № 2.