

Как видно из таблицы, наиболее существенное возрастание диэлектрической проницаемости наблюдается при степенях сжатия $\sigma > 1,65$. Сравнение полученных результатов с измерениями $\varepsilon(p)$ в статике [5] показывает существенное превышение последних над динамическими. Это объясняется тем, что при ударном сжатии на диэлектрик действуют одновременно давление и температура, которые в исследуемом диапазоне давлений противоположно влияют на диэлектрическую проницаемость.

Поступила в редакцию
13/II 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, ПТЭ, 1963, 1.
2. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. В. Якушев, ПМТФ, 1968, 5.
3. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников, ПМТФ, 1969, 4.
4. А. Г. Иванов, Е. З. Новицкий, ПМТФ, 1966, 5.
5. Г. И. Сканава. Физика диэлектриков (область слабых полей). М., ГИТТЛ, 1949.

УДК 532.593

К ВОПРОСУ О ВОЗБУЖДЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВАХ В МЯГКИХ ГРУНТАХ

Н. П. Горбачева
(Москва)

С целью изучения зависимости величины энергии взрыва, передаваемой в упругую волну, от характеристик воздействия взрывного источника на грунт были проведены опыты с использованием взрывчатых веществ с нормальной и пониженной скоростями детонации.

В опытах использовались смеси, изготовленные на основе аммиачной селитры с добавлением тротила (угленил) или гексогена (смесь № 2). В качестве инертной добавки, способствующей снижению скорости детонации, применялась поваренная соль. Типы взрывчатых веществ, состав и основные характеристики приведены в табл. 1. Вес заряда, изготовленного из ВВ с малой скоростью детонации, рассчитывался таким образом, чтобы общее количество его энергии соответствовало энергии эталонного тротилового заряда:

$$q = q_{\text{тнт}} \frac{Q_{\text{тнт}}}{Q},$$

где $q_{\text{тнт}}$, $Q_{\text{тнт}}$ и q , Q — соответственно вес и теплота взрывчатого превращения тротилового заряда и сравниваемого ВВ. Поскольку удельная энергия тротила почти вдвое превышает удельную энергию угленила и смеси № 2, то и вес зарядов, изготовленных из взрывчатых веществ с малой скоростью детонации, почти вдвое превышал вес эталонного

Таблица 1

ВВ	Теплота взрыва, ккал/кг	Плотность ВВ, г/см ³	Скорость детонации, м/сек	Критический диаметр детонации, мм	Работоспособ- ность, с/м ³	Безвзвзвность, мм	Объем газов, л/кг	ρD^2 , кг/см ³
Тротил	1000	1,6	7000	11	285	> 16,5	700	$8 \cdot 10^5$
Аммонит № 6 (21% тротила, 79% аммиачной селитры)	1028	1,2	4000	12	370	16	892	$2 \cdot 10^5$
Угленит № 75 В (5% тротила, 70% селитры аммиачной, 25% поваренной соли)	1000	1,0	3500					$1 \cdot 10^5$
Смесь № 2 (10% чистого гек- согена, 20% аммиачной се- литры, 70% поваренной соли)	330	1,2	1800	36,5	80	8,5	—	$0,4 \cdot 10^5$
	291	1,0	1600	28	—	—	262	$0,3 \cdot 10^5$

тротилового заряда. Заряды изготавливались таким образом, чтобы отношение длины заряда к его диаметру было постоянным.

Взрывы осуществлялись зарядами различного веса — от 0,02 до 26 кг во взрывных скважинах с забойкой из грунта (в лессах) или воды (в глинах). Заряды, помещаемые в водонаполненные скважины, тщательно изолировались. Опыты проводились в различных мягких грунтах: в плотных, пластичных глинах со скоростью распространения продольных волн $v_p = 1750$ м/сек и сжимаемостью $\rho v_p^2 = 6 \cdot 10^4$ кг/см²; в глинах с прослоями песчаника $v_p = 1750$ м/сек, $\rho v_p^2 = 3,6 \cdot 10^4$ кг/см²) и в лессах ($v_p = 600$ м/сек, $\rho v_p^2 = 0,56 \cdot 10^4$ кг/см²).

Регистрация скоростей смещения и смещения грунта осуществлялась различными типами сейсмической аппаратуры. При обработке сейсмограмм и осциллограмм использовались преимущественно первые вступления и гипоцентральные расстояния (кратчайшие расстояния от источника взрыва до точек наблюдения).

В результате экспериментов обнаружена независимость сейсмического эффекта взрыва и объема камуфлетных полостей от типа применяемого взрывчатого вещества.

В лессе испытывались аммонит насыпной плотности и угленит, скорости детонации которых соответственно вдвое и вчетверо меньше скорости детонации тротила. Регистрация смещений грунта осуществлялась приборами ВЭГИК с записью на осциллограф ПОБ-12.

Из рассмотрения рис. 1, 2 видно, что у энергетически равных зарядов амплитуды смещений как в ближней, так и в упругой зонах взрыва одинаковы. Амплитудная зависимость $a = f(r)$ аппроксимируется ломаной линией, прямолинейные участки которой описываются соотношением $a = K_{1-3} r^{-n}$ с показателем степени n , равным 4 и 1 в ближней зоне взрыва и 2 в дальней упругой зоне.

На кусочно-линейное поведение амплитудной зависимости $a = f(r)$ при регистрации смещений вблизи взрыва указывалось в работе [1]. Размеры полостей, замеренные после взрывов, не зависят от типа ВВ, и их радиусы хорошо согласуются с вычисленными по формуле

$$r_k = K_k \sqrt[3]{\frac{Q}{q}} \sqrt[3]{\frac{Q}{Q_{\text{ТНТ}}}},$$

где r_k — радиус камуфлетной полости, м; K_k — коэффициент, зависящий от прочностных свойств грунта, м/кг^{1/3}; q — вес заряда, кг. Множи-

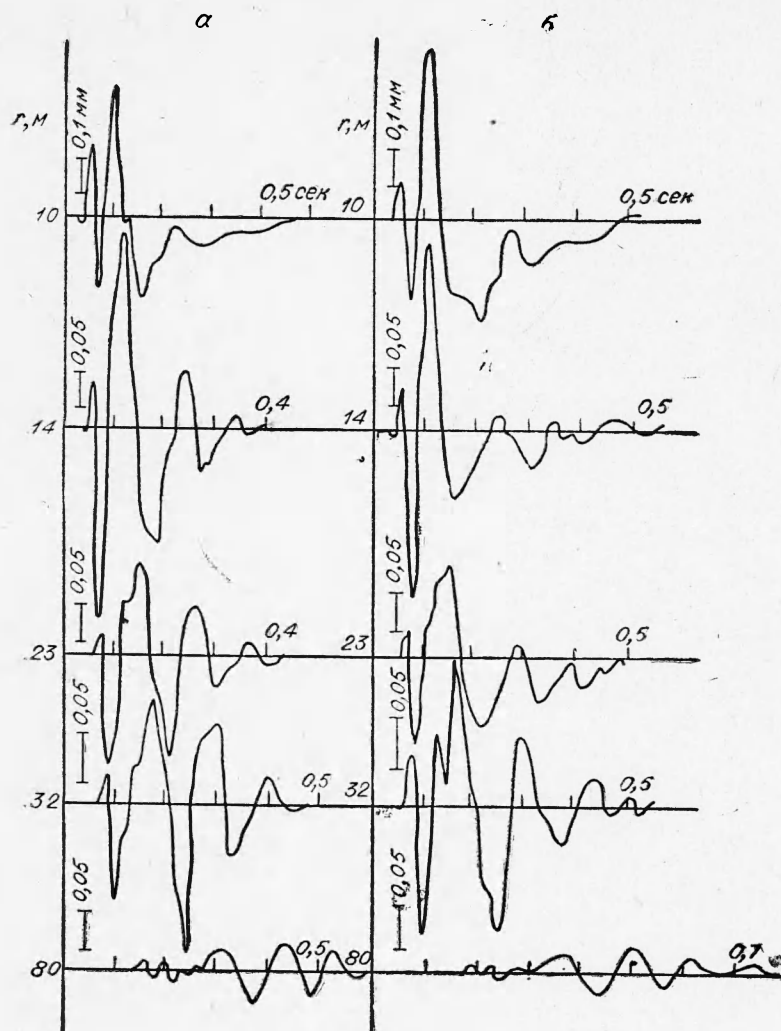


Рис. 1. Колебания грунта на различных расстояниях от взрывов энергетически эквивалентных зарядов:
а — тротил, $q=4,5$ кг; б — угленит, $q=13$ кг.

тель $\sqrt[3]{\frac{Q}{Q_{\text{ТНТ}}}}$ служит для приведения веса заряда ВВ к тротиловому эквиваленту. В нашем случае $K_k = 0,48 \text{ м/кг}^{1/3}$, что несколько превышает значение коэффициента, приведенного в работе [2]. Это объясняется различными физико-механическими свойствами лессов.

Опыты в глинах проводились на двух площадках. Верхняя часть скоростного разреза у пункта взрыва оказалась одинаковой для обеих площадок, что позволило сравнивать между собой результаты измерений. Заряды из тротила и угленита, применявшиеся на первой площадке, помещались в скважины на глубинах 24 и 60 м. На второй площадке использовались заряды из смеси № 2 и тротила, которые подрывались на глубине 14 м. Обладая одинаковой скоростью распространения продольных волн ($\tilde{v}_p = 1750 \text{ м/сек}$), глины резко отличались по своему

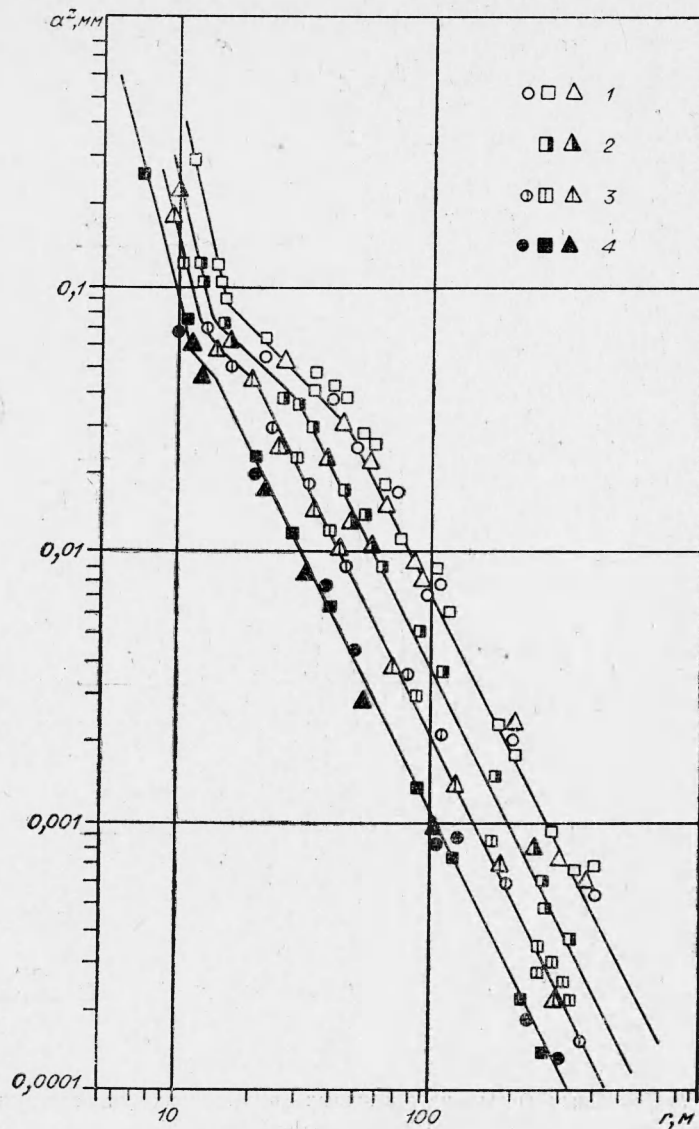


Рис. 2. Зависимость амплитуды смещения в первом вступлении от гипоцентрального расстояния при взрыве на глубине 7 м энергетически равных зарядов тротила, аммонита и угленита различного веса, кг.

1 — $q_{\text{ТНТ}} = q_{\text{амм}} = 9$; $q_{\text{угл}} = 26$; 2 — $q_{\text{ТНТ}} = q_{\text{амм}} = 4,5$,
 $q_{\text{угл}} = 13$; 3 — $q_{\text{ТНТ}} = q_{\text{амм}} = 2,4$, $q_{\text{угл}} = 7$;
 4 — $q_{\text{ТНТ}} = q_{\text{амм}} = 0,4$, $q_{\text{угл}} = 1$.

составу и физико-механическим свойствам. В первом случае это плотные, однородные пластичные глины, во-втором — сильно поглощающие, слабые глины с прослоями песчаника. Колебания грунта регистрировались вибрографами ВИБ-А и ВИБ-У с записью на осциллограф Н-700 и сейсмоприемниками СПМ-16 с записью на широкополосную сейсмическую станцию ШПСС.

На рис. 3 приводятся графики зависимости амплитуды скорости смещения от приведенного расстояния, полученные при взрывах на глу-

бине 14, 24 и 60 м зарядов, изготовленных из тротила, угленита и смеси № 2. Видно, что разница в скоростях детонации взрывчатых веществ не отразилась на полученных результатах. Для расчета скоростей смещения u получена эмпирическая формула, единая для всех типов использованных ВВ

$$u = K_u \frac{q^{2/3}}{r^2} \text{ см/сек},$$

где $q = g_{\text{ТНТ}} \frac{Q}{Q_{\text{ТНТ}}}$, кг. Глубинам заложения зарядов 14, 24 и 60 м соответствуют значения коэффициентов K_u 15, 20 и 40.

Таким образом, опытные данные обнаруживают независимость сейсмического эффекта взрыва в мягких грунтах от скорости детонации применявшихся взрывчатых веществ.

Изготовление ВВ с еще более низкой стабильной скоростью детонации связано со значительными трудностями. Предельно низкое значение скорости детонации равно 1000 м/сек.

Взрывчатые газовые смеси обладают скоростью детонации 2000—2500 м/сек и очень низкой плотностью, которая увеличивается по мере заглубления газового источника. Произведение плотности газовой смеси ρ на квадрат скорости детонации D^2 на несколько порядков ниже, чем у стандартных ВВ.

В табл. 2 приведены основные характеристики применяемой в опытах газовой смеси и эквивалентного по энергии заряда гексогена. Подрыв газовой смеси осуществлялся при помощи газовой установки, состоящей из стальной трубы, заполненной газом. Газовая установка помещалась во взрывную скважину или металлический бассейн, наполненные водой. Размеры бассейна (2×2×2 м) таковы, что сейсмический импульс достигает стенок бассейна раньше, чем закончится формирование газового пузыря и начнется его пульсация.

На рис. 4 приведена осциллограмма, полученная на осциллографе МПО-2 от детонации 2 л газовой смеси (а) и 2,8 г флегматизированного гексогена (б). Взрывы проводились в воде на глубине 0,6 м в металлическом бассейне, врытом в землю. Вибрографы располагались на расстоянии 3 (1) и 8 (2) м от бассейна. Первые вступления на осциллограммах идентичны, записи поверхностных волн несколько разнятся.

При помещении газовой установки во взрывную скважину, сейсмо-

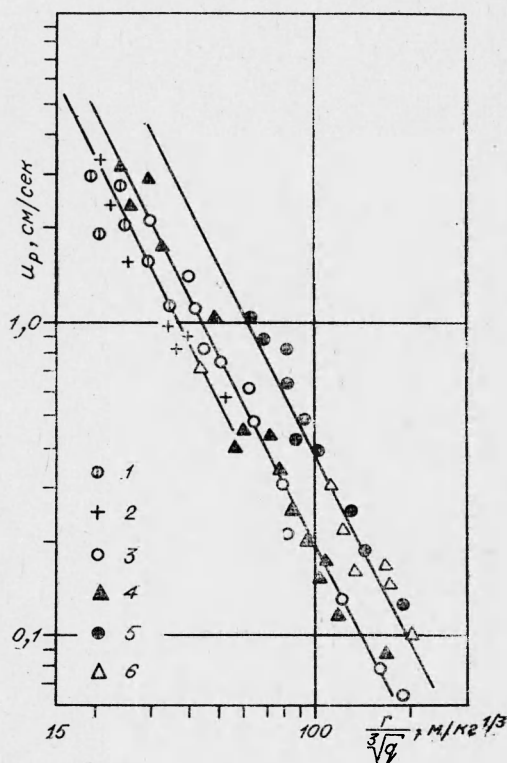


Рис. 3. Зависимость амплитуды скорости смещения от приведенного расстояния при взрывах зарядов различных ВВ на различных глубинах.

$H=14$ м: 1 — тротил; 2 — смесь № 2; $H=24$ м: 3 — тротил; 4 — угленит; $H=60$ м: 5 — тротил, 6 — угленит.

Таблица 2

ВВ	ρ , г/см ³	D , м/сек	Q , ккал/кг	E , ккал	r_0 , мм	ρD^2 , кг/см ²
Пропан-бутан — кислородная газовая смесь	$1,5 \cdot 10^{-3}$	2300	1166	3,5	7,8	$8 \cdot 10$
Шашечка флегматизированного прессованного гексогена	1,6	7500	1300	3,6	0,75	$9 \cdot 10^5$

граммы от взрыва газовой смеси, полученные с помощью полевой сейсмической станции, ничем не отличались от сейсмограмм, полученных при взрывах в той же скважине энергетически эквивалентного количества гексогена. Обнаруженное некоторое различие в записях поверхно-

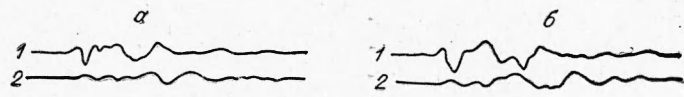


Рис. 4. Осциллографическая запись колебаний грунта на расстоянии 3 и 8 м от детонации.

стных волн побудило провести тщательный анализ поверхностных волн, полученных при взрыве в лессе зарядов угленита и тротила. На рис. 5 приведены графики зависимости амплитуд максимальной и последующих фаз поверхностных волн при взрыве энергетически равных заря-

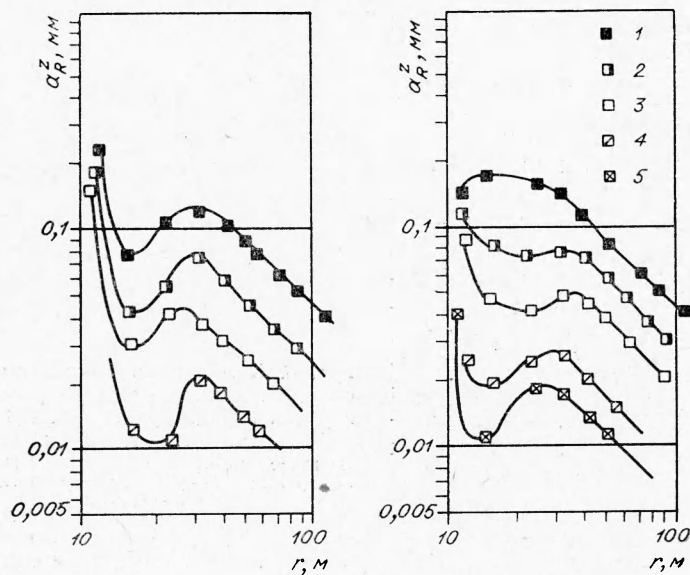


Рис. 5. Зависимость амплитуд поверхностных волн от расстояния при взрыве на глубине 7 м энергетически эквивалентных зарядов.

а — тротил, $q=4,5 \text{ кг}$; б — угленит, $q=13 \text{ кг}$. 1 — максимальная фаза поверхностных волн R_2^{max} ; 2—5 — последующие фазы поверхностных волн R_3, R_4, R_5, R_6 .

дов тротила и угленита. Из приведенных зависимостей видно, что процесс формирования поверхностных волн зависит от особенностей источника. После того как поверхностная волна сформировалась и вышла на прямую с $n=1$, амплитуда поверхностных волн не зависит от свойств взрывчатых веществ.

Анализ выполненных исследований в мягких грунтах показал независимость размеров полости взрыва и параметров сейсмических волн от характеристик взрывчатых веществ. Отмечено влияние свойств источника на формирование поверхностных волн.

В заключение автор благодарит С. С. Григоряна за обсуждение работы и ценные замечания.

*Поступила в редакцию
3/XII 1969*

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Харин, Н. В. Кузьмина, Г. И. Данилова. ФГВ, 1966, 2, 4.
2. С. С. Григорян, Г. М. Ляхов и др. ПМТФ, 1963, 4.

УДК 532.593

ЗАТУХАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ТРУБАХ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ

*Б. Д. Христофоров
(Москва)*

Пьезоэлектрические измерения параметров ударных волн в стальных трубах при подводном взрыве перед трубами проводились в бассейне с водой размером $2 \times 1,5 \times 1$ м³. Стальные трубы диаметром $d=0,078$ и $0,052$ м, длиной $1,2$ м и отношением диаметра к толщине стенок около 15 располагались в бассейне на глубине $0,3$ м. Микросферические заряды из тэна весом $C=0,2$ и $0,9$ г взрывались перед трубой на расстояниях от ее торца $r=0; 5; 10; 15; 25 \cdot 10^{-2}$ м. Разбрасываемый слой таких зарядов мал, и действие их взрыва подобно взрыву зарядов большого веса [1].

Параметры ударной волны измерялись турмалиновыми датчиками давления с диаметром кристаллов $1,5-3$ мм с регистрацией на двухлучевых осциллографах ОК-24МА. На каждый канал осциллографов обычно подавались сигналы от двух датчиков, расположенных в трубе на различных расстояниях x от торца (рис. 1, а). Измерения проводились на расстояниях от $0,1$ до 1 м. Заряды и датчики устанавливались вдоль оси трубы.

На приборе СФР-2М получены высокоскоростные фотографии процесса затекания ударной волны в трубу методом Теплера (см. рис. 1, б). Погрешность отдельного измерения параметров ударной волны турмалиновыми датчиками обычно меньше $\pm 10\%$. Однако разброс результатов измерений от их среднего значения иногда достигал $+15\%$, что