

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ЗАТУХАНИЕ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН В ГРУНТАХ

А. В. Михалюк, В. В. Захаров

Институт геофизики НАН Украины, 252054 Киев, Украина

Приведены результаты изучения волновых процессов в грунтах при камуфлетных взрывах и взрывах на выброс зарядов различных взрывчатых веществ (ВВ). Показано влияние свойств ВВ на амплитуду взрывных волн и ее изменение с расстоянием от очага взрыва. Предложен критерий сравнения механического действия разных ВВ в грунтах и эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать напряженное состояние массива при использовании ВВ, отличающихся от эталонных.

Взрывные работы в грунтах — достаточно распространенный вид инженерной деятельности. Они используются при сооружении подземных и открытых резервуаров, устройстве свай с камуфлетной пятой, ликвидации просадочности грунтового массива, посадке насыпей на минеральное дно болот и т. п. Поэтому их качеству, технологической и экономической эффективности уделялось и уделяется большое внимание.

Различные формы полезной работы взрыва в грунтах (уплотнение, разрушение и др.), как правило, связывают со способностью взрыва создавать в массиве интенсивное напряженное состояние, имеющее характер нестационарного волнового возмущения, которое в силу особенностей его эволюции во времени и пространстве принято называть взрывной волной. Очевидно, что наибольшей надежностью для инженерных расчетов в грунтах обладают такие данные о параметрах взрывных волн, которые установлены для горно-геологических условий и типов взрывчатых веществ (ВВ) и конструкций зарядов, соответствующих условиям проведения промышленных взрывов. Однако столь благоприятная ситуация редко соблюдается даже в отношении применяемых ВВ: в большинстве случаев при изучении параметров волновых процессов используется некое эталонное взрывчатое вещество с достаточно стабильным режимом взрывчатого превращения (как правило, прессованный тринитротолуол), в то время как при промышленных взрывных работах чаще всего применяют более дешевые аммиачно-селитряные ВВ и ВВ простейшего состава — игданит, ифзанит и др., генерирующие в массиве волновые возмущения

с существенно отличающимися амплитудно-частотными характеристиками, определяющими реакцию окружающей среды.

Несмотря на обилие исследований, посвященных волновым процессам в грунтах при подземных взрывах, лишь в [1] удалось обнаружить формальное обсуждение особенностей затухания взрывных волн при взрывах разнотипных ВВ, проведенное на основе ограниченных экспериментальных данных. В связи с этим ниже изложены результаты специального исследования, целью которого было выяснение возможности прогнозирования напряженного состояния массива при взрывах зарядов с использованием ВВ, отличных от эталонных.

Известно, что изменение интенсивности взрывных волн ( $\sigma$ ) с расстоянием от очага взрыва ( $r$ ) связано с геометрией фронта волнового возмущения и диссипативными потерями его энергии в среде. Для описания зависимостей  $\sigma_i(r)$  ( $i$  — координаты) предложено большое количество теоретических и экспериментальных соотношений [2–6 и др.]. Экспериментальные наблюдения чаще всего представляют в виде соотношения  $\sigma_i(r) = k_i r^{-\mu_i}$ , позволяющего легко использовать принцип геометрического подобия для описания волновых процессов в грунтах при взрывах разномасштабных зарядов:

$$\sigma_i(r) = k_i (r/r_3)^{-\mu_i}, \quad (1)$$

где  $k_i$  и  $\mu_i$  — экспериментальные коэффициенты,  $r_3$  — радиус заряда.

Из (1) видно, что коэффициенты  $k_i$  и  $\mu_i$  должны зависеть от свойств ВВ. При  $r = r_3$  коэффициент  $k$  для радиальной компоненты тензора напряжений численно равен давлению

продуктов детонации на стенки зарядной камеры, которое определяется детонационными свойствами ВВ:

$$p = \frac{\rho_{\text{ВВ}} D^2}{2(1 + \gamma)} [7] \quad \text{или} \quad p = \frac{\rho_{\text{ВВ}} Q_V (\gamma - 1)}{1 - \alpha \rho_{\text{ВВ}}} [8], \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{ВВ}}$  — плотность ВВ;  $D$  — скорость его детонации;  $\gamma$  — показатель политропы продуктов детонации,  $\gamma = c_p / (c_p - R)$ ;  $c_p$  — средняя теплоемкость продуктов взрыва при постоянном давлении;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $Q_V$  — теплота взрыва при постоянном объеме;  $\alpha$  — коволюм, отнесенный к 1 кг газообразных продуктов детонации. Из этих соотношений видно, что чем выше детонационные свойства ВВ, тем больше значение  $k$ , что экспериментально показано в [1].

Зависимость коэффициента  $\mu$  от свойств ВВ не столь очевидна, но легко объяснима. В ряде работ [9, 10 и др.] было показано, что чем выше амплитуда импульсного возмущения, тем больше преобладают высокочастотные колебания в его спектре, затухающие интенсивнее, чем низкочастотные колебания. Соответственно значение коэффициента  $\mu$  при взрывах зарядов высокобризантных ВВ должно быть больше, чем у ВВ других типов, на что обращалось внимание в [1, 11].

Описанные ниже исследования включали анализ напряженного состояния грунтового массива при взрывах сосредоточенных и линейно-распределенных зарядов камуфлетного действия и выброса с использованием следующих типов ВВ: тэна (прессованного и порошкообразного), гексогена, тротила, алюмотола, аммонита 6ЖВ, зерногранулита 79/21, игданита, скального аммонита № 1 (порошкообразного и патронированного). Взрывы проводились в светло-коричневых песчанистых суглинках плотностью  $(1,76 \div 1,82) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и влажностью 10 ÷ 12 %, в аналогичных грунтах плотностью  $1,99 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и влажностью 14 ÷ 16 %, а также в зеленых глинах плотностью  $(1,80 \div 1,85) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и влажностью 23,5 %. Масса сосредоточенных зарядов варьировалась от 0,2 до 8,0 кг; погонная масса линейно-распределенных зарядов составляла 1 и 2 кг/м для взрывов камуфлетного действия и 4 кг/м для взрывов на выброс. Методика регистрации взрывных волн существенно не отличалась от изложенной в [3], однако на некоторые ее особенности следует обратить специальное внимание.

1. Плотность ВВ и скорость их детонации контролировали при каждом взрыве. Плотность порошкообразных ВВ, как правило, довели до 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup> (лишь плотность зерногранулита 79/21 и скального аммонита № 1 составляла соответственно 850 и 950 кг/м<sup>3</sup>). Скорость детонации проверялась путем измерения времени прохождения детонационной волны некоторого строго установленного расстояния по длине заряда; момент вступления детонационной волны фиксировался по сигналам ионизационных датчиков с использованием измерителя временных интервалов Ф-5080 разрешающей способностью до 0,1 мкс.

2. Условие камуфлетности действия взрыва принималось по [12]; общее количество взрывов 24.

3. Датчики, регистрировавшие радиальные напряжения во взрывных волнах, устанавливались на глубине размещения заряда так, чтобы последующий датчик не попадал в «тень» предыдущих. Количество датчиков в каждой точке измерений определялось исходя из требования, что доверительный интервал варьирования измеряемой величины не должен превышать среднюю квадратическую ошибку ее определения. Несложно показать, что это условие удовлетворяется, если в каждой точке размещается не меньше трех независимых датчиков напряжений. В расчет принималось среднее арифметическое значение измеряемой величины.

4. Сигналы датчиков напряжений регистрировались как в аналоговом, так и в цифровом виде; для их регистрации использовались многоканальные светолучевые осциллографы Н-115 и К-117; промежуточное усиление сигналов обеспечивалось станциями «Топаз». Сигналы отдельных датчиков параллельно регистрировались осциллографами С9-16 с использованием в качестве промежуточных усилителей С8-13, что обеспечивало контроль работы светолучевой аппаратуры как по амплитуде, так и по частоте регистрируемого сигнала. Результаты измерений фиксировались на магнитных носителях как в аналоговой (магнитограф Н-068), так и в цифровой форме с целью пополнения банка экспериментальных данных.

На рис. 1 приведены некоторые характерные кривые, иллюстрирующие затухание взрывных волн с расстоянием от очага взрыва. Обратим внимание на две особенности этих кривых. Во-первых, их линейный вид в би-

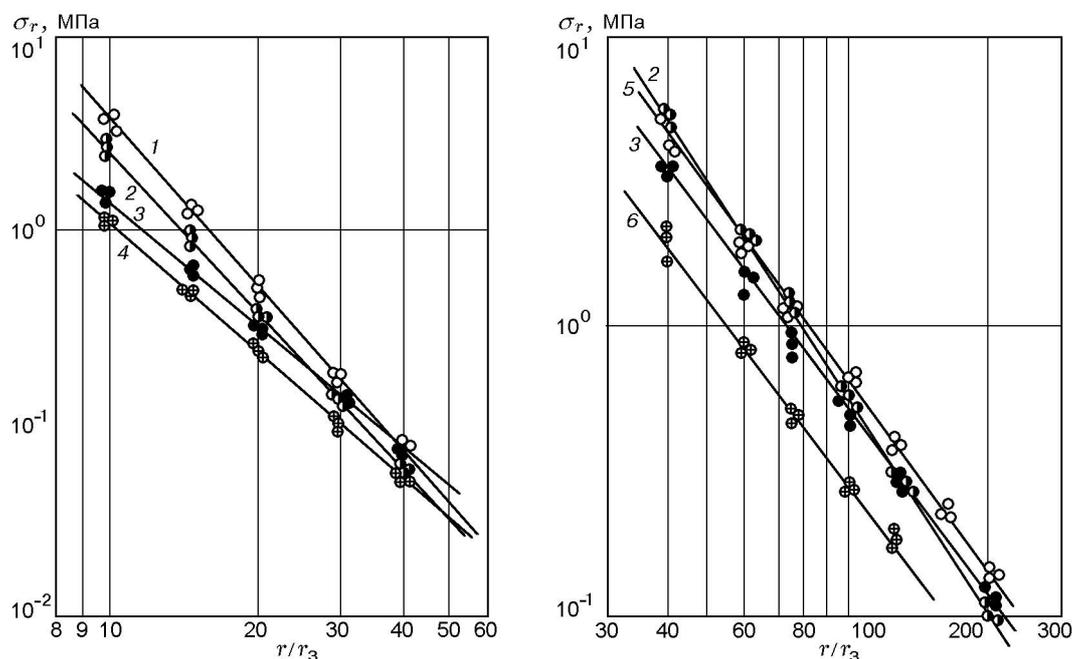


Рис. 1. Затухание взрывных волн в зависимости от расстояния от очага взрыва сосредоточенных зарядов камуфлетного действия (а) и линейно-распределенных зарядов выброса (б):

1 — гексоген, 2 — тротил, 3 — аммонит 6ЖВ, 4 — алюмотол, 5 — аммонит скальный № 1, 6 — игданит

Таблица 1

№ п/п	Характеристика взрыва	Тип ВВ	$q$	$\chi$	$k$ , ГПа	$\mu$
1	Взрывы сосредоточенных зарядов камуфлетного действия в суглинках влажностью 10 ÷ 12 %	Гексоген	0,2; 1,6	13,71	1,88	2,79
		Тротил	0,2; 1,6	12,70	1,65	2,70
		Тэн (пресс.)	0,4	9,21	1,04	2,49
		Тэн (порошок)	1,6	7,21	0,70	2,32
		Алюмотол	0,2; 1,6	6,89	0,66	2,34
		Аммонит 6ЖВ	0,2; 1,6	3,65	0,24	2,15
		Игданит	8,0	1,98	0,12	2,03
2	То же в суглинках влажностью 14 ÷ 16 %	Тротил	0,2	12,70	2,55	2,40
		Тэн	0,2	9,21	1,64	2,26
		Аммонит 6ЖВ	0,2	3,65	0,51	1,98
3	Взрывы вертикальных зарядов камуфлетного действия в глинах влажностью 23,5 %	Тротил	1,0; 2,0	12,51	8,00	1,99
		Зерногранулит 79/21	1,0	4,25	2,01	1,82
		Аммонит скальный № 1	1,0	5,34	2,70	1,65
		Аммонит скальный № 1 (патронированный)	2,0	8,16	3,92	1,70
4	Взрывы линейно-распределенных зарядов выброса в суглинках влажностью 14,2 %	Тэн	4,0	7,18	18,31	2,27
		Тротил	4,0	12,43	45,90	2,46
		Аммонит 6ЖВ	4,0	3,65	9,68	2,14
		Аммонит скальный № 1 (порошкообразный)	4,0	6,10	16,20	2,21
		Игданит	4,0	1,98	4,20	2,09

Примечание.  $q$  — общая (кг, сосредоточенные заряды) или погонная (кг/м, удлиненные заряды) массы зарядов,  $\chi = D^2/Q$ .

логарифмических координатах свидетельствует о приемлемости зависимостей вида (1) для описания изменения с расстоянием амплитуды взрывной волны. Во-вторых, из рисунков видно, что коэффициенты  $k$  и  $\mu$  существенно зависят от свойств ВВ; результаты их определения приведены в табл. 1. Данные таблицы позволяют сделать несколько общих выводов.

1. Коэффициенты  $k$  и  $\mu$  увеличиваются с ростом детонационных свойств ВВ. Наиболее сильно это проявляется в отношении коэффициента  $k$ , значение которого для тэна, тротила, гексогена может на порядок превышать его значение для простейшего ВВ типа игданит. Зависимость  $\mu$  от свойств ВВ значительно слабее: различия в их значениях для высокобризантных ВВ и ВВ простейшего типа не превышают  $20 \div 40$  %.

2. Коэффициент  $k$  меньше при взрывах сосредоточенных зарядов и больше при взрывах удлинённых зарядов; коэффициент  $\mu$  по отношению к симметрии взрыва проявляет обратную зависимость. Следует отметить, что величина  $k$  приближается к начальному давлению продуктов детонации лишь для камуфлетных взрывов цилиндрических зарядов; при взрывах сосредоточенных зарядов камуфлетного действия она значительно меньше, а при взрывах удлинённых зарядов выброса — значительно больше расчетного значения давления продуктов детонации. Это, по-видимому, объясняется особенностями затухания взрывных волн при взрывах зарядов камуфлетного действия и выброса, а также порядком определения коэффициентов  $k$  и  $\mu$ : вследствие взаимодействия с отраженными от свободной поверхности волнами растяжения взрывные волны, генерируемые взрывами на выброс, затухают быстрее (коэффициент  $\mu$  возрастает); это сопровождается увеличением расчетного значения  $k$  (см. рис. 1); взрывные волны от зарядов камуфлетного действия затухают наиболее медленно; им соответствуют и малые значения  $k$ .

Попытки дать прогноз напряженного состояния грунтового массива при взрыве одного типа ВВ на основе данных о затухании взрывных волн ВВ другого типа предпринимались неоднократно. Так, в [8] такую операцию рекомендуют выполнять на основе принципа энергетического подобия взрывов путем определения некоторого эквивалента между данным и эталонным зарядами ВВ на основе сравнения полных идеальных работ взрыва (если в каче-

стве эталона используют тротил, эквивалент называют тротиловым; в [13] в качестве эталона рекомендуется аммонит 6ЖВ). Понятно, что такой подход приводит лишь к установлению энергетически эквивалентной массы заряда и не учитывает зависимость коэффициентов  $k$  и  $\mu$  от свойств ВВ. В [11] показано, что такие интегральные характеристики действия взрыва на выброс, как удельные расходы ВВ и энергии на единицу объема выработки, удовлетворительно коррелируют с величиной  $\rho_{ВВ} D^2 / Q_V$ , которая полнее учитывает свойства ВВ. Каждый из этих путей прогнозирования действия зарядов различных ВВ имеет свои недостатки. Так, использование идеальной работы взрыва в качестве сравнительной характеристики допустимо для тех взрывных технологий, где имеет место расширение продуктов детонации до атмосферного давления (взрывы на выброс, разрушение горных пород на открытых и подземных разработках, металлообработка и т. п.). При внутренних взрывах расширение продуктов детонации ограничено противодействием  $p_s$  окружающей среды, зависящим от свойств грунта, режима нагружения и вида напряженного состояния [3]. Противодействие определяется структурной прочностью деформированного грунта и горным давлением в очаге взрыва. Для глинистых грунтов значение  $p_s$  приближенно может быть установлено по формуле

$$p_s = \sigma_s + \gamma_0 h, \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  — структурная прочность грунта при данных скорости и неравномерности нагружения,  $\gamma_0$  — объемная плотность грунта,  $h$  — глубина заложения заряда. Согласно [3] значение  $\sigma_s$  в глинах и суглинках может составлять  $1 \div 1,25$  МПа и более. Как показано в [8], это сопровождается уменьшением количества энергии, излученной в массив:

$$Q \approx Q_V \left[ 1 - \left( \frac{p_s}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]. \quad (4)$$

Недостатком критерия, предложенного в [11], является его размерность, что не только противоречит теории подобия, но и требует физически неоправданного использования размерных коэффициентов, входящих в те или иные основанные на нем корреляционные зависимости. Этот недостаток легко преодолеть, используя в качестве характеристики ВВ соотношение  $\chi = D^2/Q$ , которое в той же мере учитывает свойства ВВ, но является безразмерной

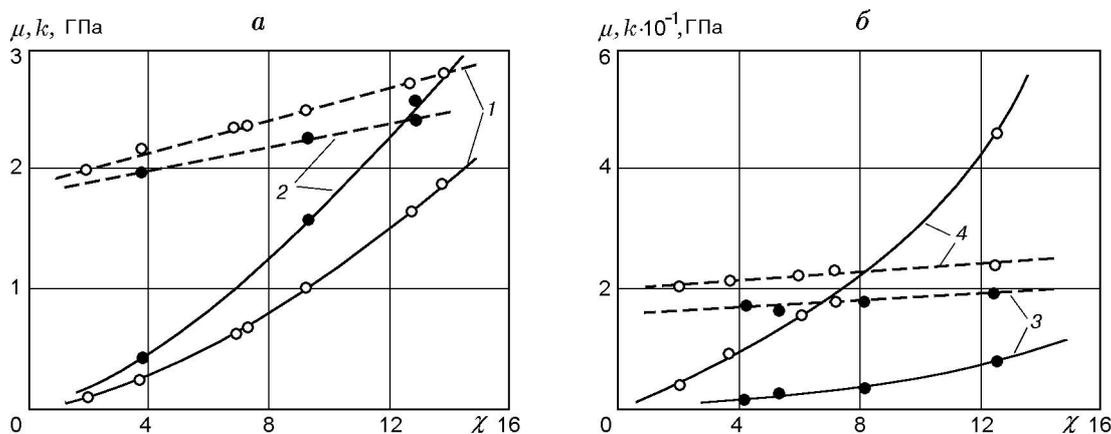


Рис. 2. Зависимости коэффициентов  $k$  (сплошные линии) и  $\mu$  (штриховые линии) от параметра  $\chi$ :

номера кривых соответствуют номерам взрывов в табл. 1

величиной. Для ВВ, использованных при экспериментальных взрывах, значения  $\chi$  даны в табл. 1.

На рис. 2 приведены зависимости  $k(\chi)$  и  $\mu(\chi)$ . Обращает на себя внимание ряд общих закономерностей, не зависящих от характера работы продуктов детонации или симметрии взрыва.

1. Для всех типов проведенных взрывов коэффициент  $k$  нелинейно возрастает с увеличением параметра  $\chi$ . Это увеличение значительно интенсивнее при взрывах на выброс, чем при камуфлетных взрывах. Несколько слабее проявляется влияние на зависимость  $k(\chi)$  изменения структурной прочности грунта, однако и оно достаточно ощутимо: с ростом структурной прочности скорость увеличения коэффициента  $k$  повышается, что наглядно видно из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 2 (структурная прочность суглинков влажностью 10 ÷ 12 % примерно в 1,5 раза больше, чем у аналогичных грунтов влажностью 14 ÷ 16 %).

2. Коэффициент  $\mu$  линейно связан с параметром  $\chi$ . Эта зависимость характеризуется слабым возрастанием  $\mu$  с увеличением  $\chi$ , что подтверждает тот факт, что величина  $\mu$  сильнее зависит от свойств грунта и симметрии взрыва, чем от свойств ВВ.

3. Учитывая малый разброс экспериментальных точек вокруг кривых  $k(\chi)$  и  $\mu(\chi)$ , можно сделать вывод о том, что параметр  $\chi = D^2/Q$  является достаточно надежной сравнительной характеристикой ВВ различных типов по волновым процессам в грунтах. Это под-

тверждается и изменением в зависимости от  $\chi$  такой интегральной характеристики действия взрыва в грунте, как удельный расход его энергии на единицу объема выработки  $W$ , показанным (с использованием данных работы [11]) на рис. 3.

Математическая обработка методом наименьших квадратов зависимостей  $k(\chi)$  и  $\mu(\chi)$ , представленных на рис. 2, показала возможность аппроксимации этих кривых соотношениями вида

$$k(\chi) = a\chi^b, \quad \mu(x) = \alpha\chi + \beta, \quad (5)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  — экспериментальные коэффициенты, их значения приведены в табл. 2. Определение этих коэффициентов сопровождалось

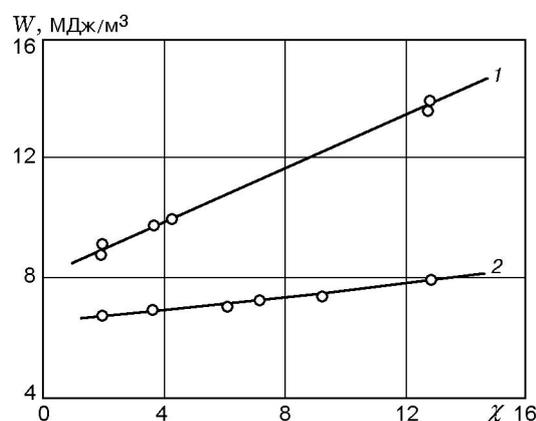


Рис. 3. Зависимости  $W(\chi)$  для лессов (1) [11] и суглинков (2) при взрывах линейно-распределенных зарядов выброса

Таблица 2

№ п/п	Взрывы	$k(\chi)$			$\mu(\chi)$		
		$a$	$b$	$k_k$	$\alpha$	$\beta$	$k_\mu$
1	Камуфлетные взрывы сосредоточенных зарядов в суглинках влажностью 10 ÷ 12 %	0,0398	1,4615	82,6	0,0652	1,8910	38,5
2	То же в суглинках влажностью 14 ÷ 16 %	0,0794	1,3333	95,4	0,0481	1,8038	88,8
3	Взрывы вертикальных зарядов камуфлетного действия в глинах	0,2900	1,2800	88,6	0,0323	1,5484	94,3
4	Взрывы линейно-распределенных зарядов выброса	2,1000	1,1660	38,0	0,0323	2,0320	91,6

расчетом коэффициентов корреляции  $k_k$  и  $k_\mu$ , и хотя при относительно небольшом количестве экспериментальных точек на каждой кривой эти коэффициенты не являются устойчивыми, тем не менее в известной степени они характеризуют плотность связи коэффициентов  $k$  и  $\mu$  со свойствами ВВ через параметр  $\chi$ . Полученные значения коэффициентов корреляции также даны в табл. 2.

Линейный вид соотношения  $\mu(\chi)$  позволяет легко представить показатель затухания взрывных волн с ростом расстояния от очага взрыва в виде суммы двух слагаемых:

$$\mu(\chi) = \mu_c + \mu_d(\chi), \quad (6)$$

где  $\mu_c$  — константа, характеризующая симметрию взрыва и, следовательно, не зависящая от свойств грунтов, амплитудно-частотных характеристик взрывных волн, механизмов диссипации их энергии и т. д. [4];  $\mu_d$  — показатель, учитывающий различные формы диссипации энергии взрыва в грунтовом массиве. Понятно, что  $\mu_c$  не зависит также и от свойств ВВ, в то время как  $\mu_d$  зависит и от свойств ВВ, и от расстояния. С учетом соотношения (6) зависимость (1) можно представить как затухание идеально упругой волны с начальной амплитудой  $k$  и поправкой  $\zeta(r, \chi)$  на диссипативные потери:

$$\sigma(r) = k(r/r_3)^{-\mu_c} \zeta(r, \chi), \quad (7)$$

где  $\zeta(r, \chi) = r_3^{\mu_d} r^{-\mu_d}$ . Согласно [4]  $\mu_c = 1$  при взрывах центрально-симметричных зарядов;  $\mu_c = 0,5$  для взрывов с осевой симметрией и  $\mu_c = 0$  для взрывов с плоской симметрией.

Слабая зависимость  $\mu$  от  $\chi$  свидетельствует о том, что для широкого прак-

тического применения в различных горно-геологических условиях зависимости (5) должны включать некоторую универсальную характеристику грунта, отвечающую за величину поправки  $\zeta$ . В [10] в качестве такой универсальной характеристики предложен комплексный показатель деформативности  $\eta$ , объединяющий плотность и влажность грунта:  $\eta = \rho/(1 + w)$ . В [14] свойства грунта предлагается учитывать через отношение влажности грунта к его пористости. К сожалению, ограниченность экспериментальных данных о затухании взрывных волн от разных ВВ в различных грунтовых условиях не позволяет предложить достаточно надежный метод учета влияния свойств грунта на коэффициенты  $k$  и  $\mu$ , однако установленная выше качественная идентичность зависимостей  $k(\chi)$  и  $\mu(\chi)$  для камуфлетных взрывов и взрывов на выброс в разнообразных грунтовых условиях дает основание ожидать, что с накоплением таких данных удастся решить и эту проблему.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Вовк О. О., Плаксий В. О., Лебідь С. Г.** Про вплив властивостей вибухових речовин на параметри вибухових хвиль у зв'язних грунтах // Доп. АН УССР. 1968. Сер. Б. № 10. С. 904–907.
2. **Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др.** М.: Недра, 1971.
3. **Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок / А. А. Вовк, Б. В. Замышляев, Л. С. Евтерев и др.** Киев: Наук. думка, 1984.
4. **Миронов П. С.** Взрывы и сейсмобезопасность сооружений. М.: Недра, 1973.
5. **Боровиков В. А., Ванягин И. Ф.** К расчету параметров волны напряжения при взрыве

- удлиненного заряда в горных породах // Взрыв. дело. 1976. № 76/33. С. 74-85.
6. **Ляхов Г. М., Полякова Н. И.** Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. М.: Недра, 1967.
  7. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Челышев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.
  8. **Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И.** Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1973.
  9. **Кравец В. Г.** Динамика уплотнения грунтового массива взрывом. Киев: Наук. думка, 1979.
  10. **Действие** крупномасштабных взрывов в массиве горных пород. Ч. 2 / А. Н. Щербань, Г. К. Акутин, А. А. Вовк и др. Киев: Наук. думка, 1974.
  11. **Вовк А. А., Черный Г. И., Михалюк А. В.** Влияние свойств взрывчатых веществ на эффективность взрывов в грунтах // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 13, № 3. С. 446-450.
  12. **Евстропов Н. А.** Взрывные работы в строительстве. М.: Стройиздат, 1965.
  13. **Нормативный справочник** по буровзрывным работам / Ф. А. Авдеев, В. Л. Барон, И. Л. Блейман и др. М.: Недра, 1975.
  14. **Михалюк А. В., Захаров В. В.** Деформационное последствие в грунтах и горных породах при динамических нагрузках // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2000. № 2. С. 1-9.

*Поступила в редакцию 25/V 2000 г.*

---