

**ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТОВОМ  
МАССИВЕ ПРИ ВЗРЫВАХ ЗАРЯДОВ С ВОЗДУШНЫМИ  
ОБОЛОЧКАМИ***А. А. Вовк, А. В. Михалюк**(Киев)*

Приводятся результаты экспериментальных исследований волновых процессов в грунтах при взрывах зарядов, окруженных воздушной оболочкой, и устанавливаются некоторые общие зависимости.

Один из эффективных методов управления взрывом — размещение заряда в некоторой промежуточной среде, плотность которой значительно отличается от плотности среды, являющейся основным объектом воздействия взрывного импульса. Если в качестве промежуточной применяется среда с малой плотностью и высокой сжимаемостью по сравнению с основной средой, то наблюдается уменьшение скорости нарастания давления продуктов детонации и увеличение времени его действия. Применение воздушных промежутков в зарядах в качестве промежуточной среды было впервые предложено Н. В. Мельниковым и развито в работах его школы [1, 2].

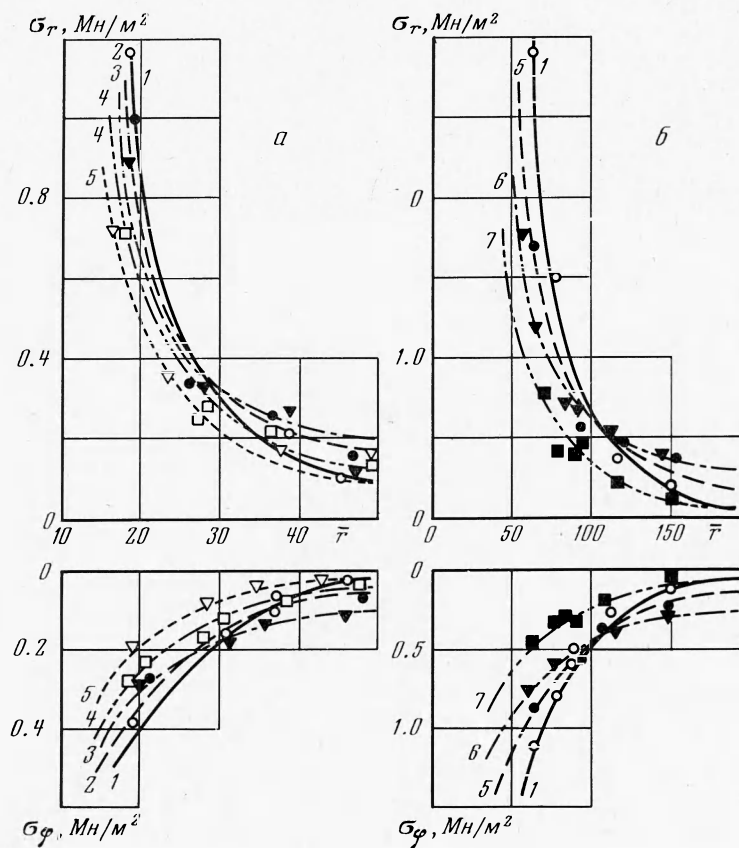
Впервые анализ волновых процессов при взрывах зарядов с воздушными оболочками в воде был проведен Б. Д. Христофоровым [3], который показал, что с увеличением размеров воздушной полости энергия, уносимая ударной волной в воде при подводном взрыве, быстро убывает. При отношении  $r_b$  радиуса воздушной полости к приведенному радиусу заряда, равному 11,8, энергия становится примерно в десять раз меньше, чем при взрыве заряда без воздушной полости. В то же время при  $r_b = 2,65$  наблюдается увеличение размеров газового пузыря на 15% и увеличение полезно используемой энергии до 59,9% (против 38,2% при взрыве без воздушной оболочки). Столь резкое снижение энергии импульса, распространяющегося в среде, при увеличении размеров воздушной полости обуславливается увеличением диссипативных потерь на нагрев воздуха.

Для условий взрывов в твердых средах решение задачи об оптимальной воздушной оболочке заряда было предложено В. Н. Родионовым [4], однако оно было основано лишь на термодинамических соотношениях расширения продуктов детонации заряда без учета волновых процессов в массиве и давало удовлетворительное совпадение с данными измерений только для скальных пород.

Изучение особенностей волновых процессов в грунтовом массиве при взрывах зарядов с воздушными оболочками проводилось с сосредоточенными зарядами камуфлетного действия (вес заряда 0,2 кг) и линейно-распределенными зарядами выброса (погонный вес ВВ 4 кг/м) в киевских суглинках плотностью 1990 кг/м<sup>3</sup>, средней весовой влажностью 14,17%. Исследовалось влияние величины воздушной оболочки заряда на параметры взрывных волн, распространяющихся в грунте при взрыве.

Во всех экспериментах в качестве взрывчатого вещества был использован прессованный тротил плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup>, скоростью детонации

6 км/сек и удельной внутренней энергией 1010 ккал/кг. Заряд размещался в специальном картонном футляре, объем которого превышал объем заряда на величину воздушной оболочки. Измерение параметров волн напряжений осуществлялось с помощью тензометрического комплекса, включавшего мембранные тензодатчики давления, усилители 8 АНЧ-7 м и УТС-1ВТ-12 и шлейфовые осциллографы Н-700. Датчики, предварительно проградуированные, устанавливались в специально пробуренные скважины на глубину размещения заряда, после чего они засы-



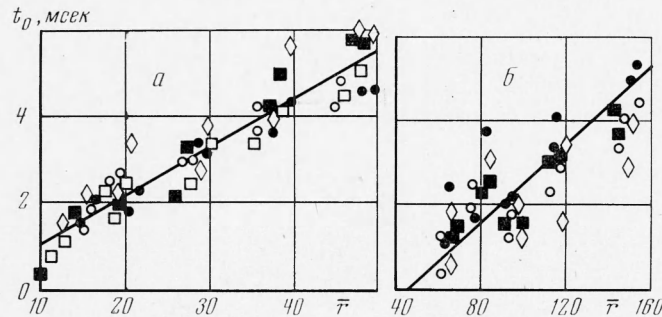
Фиг. 1

пались вынутым из скважины грунтом с послойной трамбовкой. Установка датчиков осуществлялась таким образом, чтобы обеспечивалась возможность регистрации радиальных  $\sigma_r$ , осевых  $\sigma_z$  и окружных  $\sigma_\phi$  компонент тензора напряжений.

Некоторые результаты этих экспериментов, связанные с общими закономерностями взрывов зарядов с воздушными оболочками, изложены в [5]. Ниже приводятся результаты обработки осциллограмм экспериментов.

На фиг. 1 представлено изменение максимумов радиальных и боковых напряжений с расстоянием, выраженным в радиусах заряда, при различной величине воздушных оболочек сосредоточенных зарядов камуфлетного действия (а) и линейно-распределенных зарядов выброса (б). Кривые 1—7 получены для условий, когда отношение объема воздушной оболочки

заряда к объему ВВ  $\eta$  составляет соответственно 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00. Анализ кривых показывает, что вблизи очага взрыва увеличение воздушной оболочки приводит к значительному снижению абсолютной величины давления, имеющему место до расстояния  $(25-30) r_3$  при сосредоточенных и  $(90-100) r_3$  при линейно-распределенных зарядах. На большем удалении от очага взрыва давление во взрывной волне при увеличении объема воздушной оболочки от нуля до оптимального значения  $\eta_*$  возрастает, а при  $\eta > \eta_*$  снижается. Установленное изменение мак-



Фиг. 2

симумов радиальных и боковых давлений от  $\eta$ , по-видимому, может быть объяснено перераспределением энергии деформирования грунта при взрывах зарядов с воздушными оболочками. Уменьшение максимальных давлений в ближней зоне сопровождается соответствующим снижением затрат энергии на пластическое формоизменение. Высвобождающаяся часть энергии в виде волн большей амплитуды переносится в более удаленную область зоны уплотнения, где расходуется в основном на объемное деформирование грунта. Общее снижение интенсивности взрывных волн при  $\eta > \eta_*$  объясняется резко возрастающими диссипативными потерями в самой воздушной оболочке [3].

Приведенные кривые могут быть аппроксимированы зависимостью вида

$$\sigma = kr^{-\mu} \tag{1}$$

где  $k$  и  $\mu$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от величины воздушной оболочки заряда. Расчеты показывают, что при оптимальных значениях воздушных оболочек зарядов показатель степени затухания волн с расстоянием  $\mu$  достигает минимума, что объясняется минимальными затратами энергии взрывных волн на деформирование грунта при такой конструкции заряда.

Распределение экспериментальных точек на фиг. 2, отражающих изменение с расстоянием времени прихода взрывного возмущения в произвольную точку грунтового массива  $t_0(r)$  при взрывах сосредоточенных (а) и удлиненных (б) зарядов, не дает возможности установить сколько-нибудь существенное влияние воздушной оболочки заряда на этот параметр волнового возмущения. Поэтому при различных значениях  $\eta$  зависимость  $t_0(r)$  следует принимать неизменной. Для условий проведения экспериментов в области, охваченной измерениями, аналитическое выражение функции  $t_0(r)$  будет иметь вид

$$t_0(r) = m(r - 1) \tag{2}$$

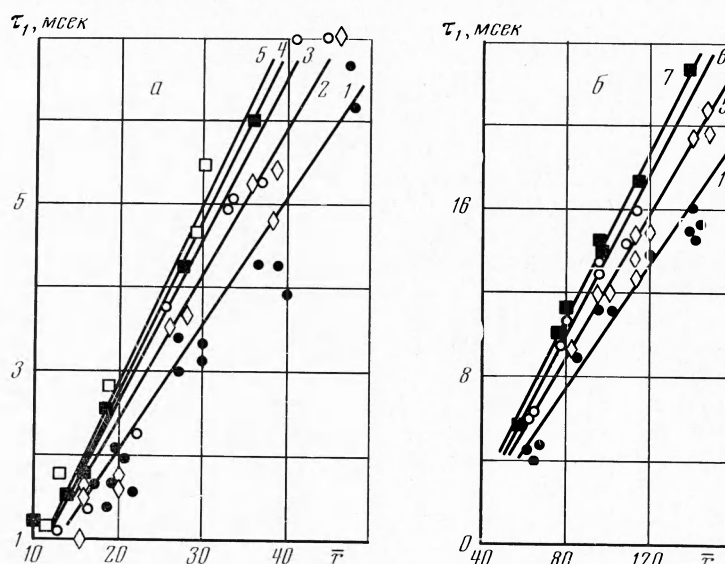
где  $m$  — эмпирический коэффициент.

Время прихода максимального давления в данную точку грунтового массива  $t_m(r)$  возрастает с увеличением объема воздушной оболочки заряда. Это возрастание носит затухающий характер и, начиная с некоторых критических значений  $\eta'$ , становится несущественным. Для взрывов с центральной симметрией  $\eta' = 1.0$ , с осевой симметрией —  $\eta' = 2.0$ .

Пользуясь полученными зависимостями  $t_m(r)$  и  $t_0(r)$ , можно найти изменение с расстоянием времени нарастания давления во взрывной волне  $\tau_1(r)$ , поскольку

$$\tau_1(r) = t_m(r) - t_0(r) \quad (3)$$

Графическая интерпретация этой зависимости для взрывов с центральной (а) и осевой (б) симметриями при указанных выше величинах воздушных оболочек, соответствующих каждой кривой, приведена на



Фиг. 3

фиг. 3. Анализ кривых показывает, что время нарастания давления во взрывной волне изменяется аналогично времени прихода максимального давления. В аналитической форме рассматриваемая зависимость может быть представлена линейной функцией вида

$$\tau_1(r) = k_1 r - q \quad (4)$$

где  $k_1$  и  $q$  — эмпирические коэффициенты.

Возрастание времени нагружения в импульсе давления и одновременное снижение максимального напряжения, имеющие место при увеличении воздушной оболочки заряда, оказывают существенное влияние на уменьшение скорости нагружения во взрывной волне. Общий характер изменения этого параметра волнового возмущения в качественном отношении аналогичен рассмотренному выше для зависимостей  $\sigma_r(r)$  и  $\sigma_\varphi(r)$ .

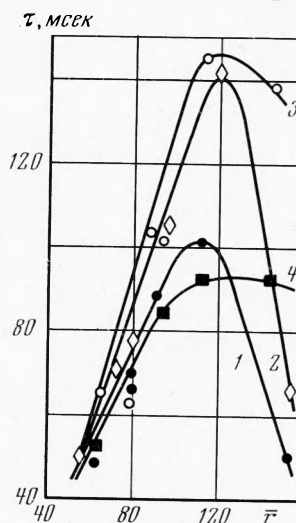
Анализ результатов экспериментов показывает, что при объемах воздушных оболочек зарядов, близких к оптимальным, следует ожидать увеличение времени действия взрывных импульсов в области малых давлений. Наиболее четко это прослеживается при взрывах линейно-распре-

деленных зарядов (фиг. 4). Здесь относительные величины воздушных оболочек составляют (соответственно номеру кривой) 0, 1.0, 1.5, 2.0. Разброс экспериментальных точек, полученный при обработке результатов взрывов сосредоточенных зарядов камуфлетного действия, не позволил прийти к каким-либо определенным выводам.

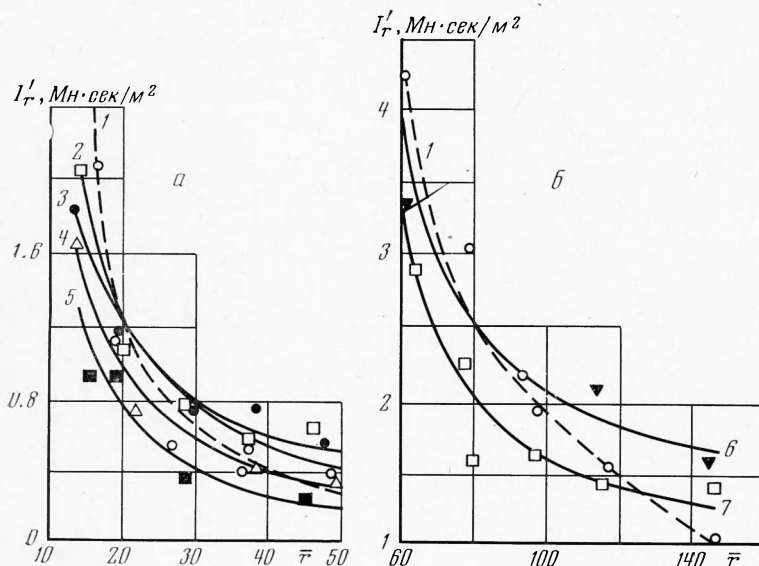
Естественно, изложенное выше изменение параметров волн напряжений при взрывах зарядов с воздушными оболочками оказывает влияние на распределение величин импульсов давления. На фиг. 5 представлены зависимости, иллюстрирующие изменение с расстоянием при различных относительных объемах воздушных оболочек величин радиальных импульсов на участке нагружения при взрывах зарядов с центральной (а) и осевой (б) симметриями (величины воздушных оболочек, соответствующих каждой кривой, см. в пояснении к фиг. 1)

$$I_r' = \int_0^{\tau_1} \sigma_r(\tau) d\tau$$

Эти кривые показывают, что при оптимальной величине воздушной оболочки заряда следует ожидать снижения абсолютной величины радиального импульса вблизи очага взрыва (при  $r < \sim 20$  для сосредоточенных и  $r < \sim 80$  для удлиненных зарядов) при некотором его увеличении на большем удалении. Это подтверж-



Фиг. 4



Фиг. 5

дает изложенный выше тезис о перераспределении энергии деформирования при изменении конструкции заряда.

Изложенное позволяет утверждать, что воздушная оболочка заряда оказывает существенное влияние практически на все параметры волнового возмущения, распространяющегося в грунте при взрыве.

