

ОБ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ В ПЕСЧАНОМ ГРУНТЕ

*И. Л. Зельманов,
О. С. Колков, А. М. Тихомиров, А. Ф. Шацкевич*
(Москва)

ВВЕДЕНИЕ

Электрический разряд использовался в качестве источника взрывного возмущения многими авторами [1—6]. Однако по ряду начальных параметров «электровзрыв» и взрыв химического взрывчатого вещества (ВВ) существенно отличаются. Такими параметрами являются в первую очередь время выделения энергии, начальное давление, температура и состав газообразных продуктов, образующихся при взрыве. Сравнение по действию различных источников взрыва, в частности электровзрыва и ВВ, проводится обычно путем введения энергетического эквивалента, под которым понимается следующее. Пусть некоторый параметр Θ движения среды, как в случае электровзрыва, так и взрыва ВВ, является функцией приведенных координаты и времени для электровзрыва

$$\Theta = \Theta_1 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{E_0}}, \frac{t}{\sqrt[3]{E_0}} \right), \quad (1)$$

для взрыва ВВ

$$\Theta = \Theta_2 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{E_0}}, \frac{t}{\sqrt[3]{E_0}} \right). \quad (2)$$

Здесь E_0 — в обоих случаях полная выделившаяся энергия.

Если при введении некоторого постоянного множителя η к энергии электровзрыва, т. е. при замене E_0 на ηE_0 , зависимость (1) переходит в зависимость (2), то электровзрыв считается энергетически подобным взрыву ВВ по рассматриваемому параметру с эквивалентом η . Обычно вместо полной энергии E_0 употребляется вес заряда ТНТ, эквивалентного взрыву по выделившейся энергии. При этом множитель η называется тротильным эквивалентом. Н. Н. Симонов и И. Я. Шляпинтох [6] установили факт подобия электровзрыва в воздухе взрыву ВВ по скорости распространения фронта ударной волны. Тротильный эквивалент оказался равным 0,35—0,4. Однако без специального исследования делать выводы о полном подобии, т. е. о том, что это же значение тротильного эквивалента сохраняется для других параметров, нельзя.

В связи с интересом, проявляемым в настоящее время к подземному взрыву, представляется целесообразным провести эксперименталь-

ное исследование электровзрыва в грунте с целью выяснения влияния свойств источника взрыва на кинематические параметры волнового движения. При этом наиболее интересны прежде всего три вопроса: отличаются ли качественно волновые картины при электровзрыве и взрыве ВВ, имеет ли место подобие при электровзрыве различных энергий и подобен ли энергетически электровзрыв взрыву ВВ, т. е. вопрос о тропиловом эквиваленте. В настоящей работе делается попытка ответить на эти вопросы.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовалось движение сухого песчаного грунта (объемная плотность $1,55 \text{ г/см}^3$ и пористость около 41%) при электровзрыве в условиях камуфлета. Сравнение проводилось с результатами по сферически симметричному взрыву ВВ в том же грунте, изложенными в опубликованной ранее работе [7]. Условия проведения опытов, описанные в [7], были воспроизведены полностью, за исключением источника взрыва. В качестве источника взрыва использовался мощный искровой разряд, создаваемый искровой разрядной установкой ИРУ [8]. Разряд происходил на дне бассейна (массивной латунной плите), заполненного песком, на торце коаксиального разрядника диаметром 20 мм. Величина выделяющейся энергии изменялась от 2,5 до 28 кДж и контролировалась в каждом опыте путем регистрации напряжения на разрядном промежутке и тока через него. Время выделения энергии около 50 мксек. Образец осциллограммы тока и напряжения приведен на рис. 1. Регистрация проводилась на осциллографе ОК-17.

В работе регистрировалась массовая скорость различных слоев грунта во времени. Использованная для этого индукционная методика, подробнее изложенная в [7], основана на регистрации э. д. с., индуцируемой в датчике при его движении вместе с грунтом в постоянном неоднородном магнитном поле, создаваемом внешним источником.

В изложении результатов эксперимента для рассмотрения вопроса о подобии при электровзрыве и удобства сравнения с результатами [7] используются приведенные время

$$\frac{t}{\sqrt[3]{C}} \quad \text{и} \quad \text{расстояния} \quad \frac{R_0}{\sqrt[3]{C}}.$$

Здесь t — время, отсчитываемое от момента взрыва, сек; R_0 — начальное расстояние от центра взрыва (лангранжева координата), м; R — расстояние от центра взрыва (эйлерова координата), м; C — удвоенный вес заряда ТНТ, кг, эквивалентного полной энергии, выделившейся в разрядном промежутке. Для проведенных опытов значение C изменяется от $1,05 \cdot 10^{-3}$ до $13,4 \cdot 10^{-3}$ кг. Удвоенные веса заряда основано на допущении об эквивалентности взрыва на дне бассейна взрыву удвоенной энергии в центре рабочего объема. Справедливость такого допущения подтверждена для взрыва ВВ в работе [7].

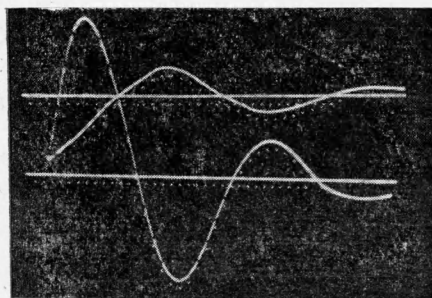


Рис. 1. Осциллограмма тока (нижний луч) и напряжения на разрядном промежутке. Интервал между метками времени 2 мксек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы массовой скорости грунта во времени. Осциллограммы расположены в порядке возрастания приведенного начального расстояния датчика от центра взрыва $\frac{R_0}{\sqrt[3]{C}}$.

Изменение общего вида осциллограмм с расстоянием носит тот же характер, что для взрыва ВВ. По мере удаления от центра взрыва нарастание массовой скорости до максимума становится все более плавным. В исследованном диапазоне энергий и расстояний время нарастания изменяется от 5 мсек до 1,5 мсек.

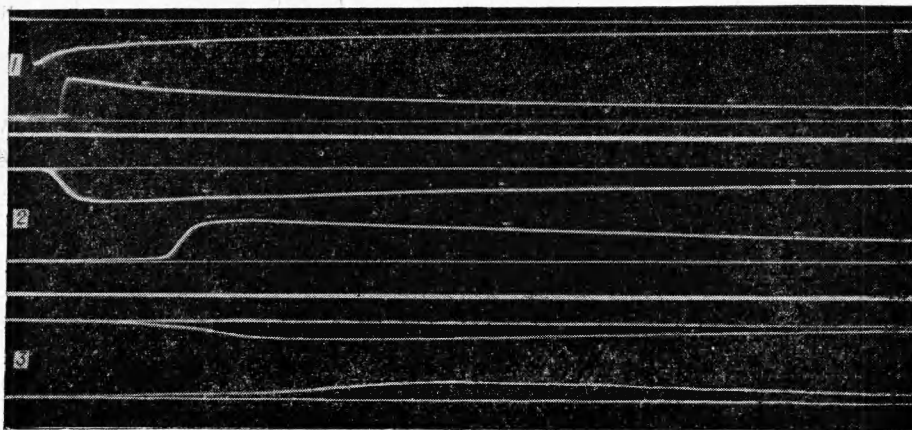


Рис. 2. Копии осциллограмм массовой скорости. Интервал между метками времени 1 мсек.
 1 — $C=4,8 \cdot 10^{-3}$ кг, $R_0=0,09, 0,11$ м; 2 — $C=12 \cdot 10^{-3}$ кг; $R_0=0,26, 0,30$ м; 3 — $C=1,2 \cdot 10^{-3}$ кг; $R_0=0,26, 0,30$ м.

Имея достаточно полный набор записей массовой скорости во времени, нетрудно получить из них распределения массовой скорости по начальной (лагранжевой) координате $\frac{R_0}{\sqrt[3]{C}}$. Такие распределения даны на рис. 3 для двух моментов времени:

$$\frac{t_1}{\sqrt[3]{C}} = 2,36 \cdot 10^{-3} \text{ сек} \cdot \text{кг}^{-1/3},$$

$$\frac{t_2}{\sqrt[3]{C}} = 1,77 \cdot 10^{-2} \text{ сек} \cdot \text{кг}^{-1/3}.$$

Серии опытов с различными энергиями электровзрыва ложатся на общие кривые, что говорит о выполнении закона подобия для электровзрыва различных энергий. Для сравнения на том же рисунке приведено аналогичное распределение для взрыва ВВ, соответствующее моменту времени

$$\frac{t}{\sqrt[3]{C}} = 2,36 \cdot 10^{-3} \text{ сек} \cdot \text{кг}^{-1/3}.$$

Как следует из рис. 3, в этот приведенный момент времени, одинаковый для электровзрыва и взрыва ВВ, наблюдается существенное превышение массовой скорости грунта для взрыва ВВ по сравнению с электро-

взрывом. Это же относится и к расстоянию, на которое распространилась волна.

Зависимости радиус — время для фронта (максимума массовой скорости) волны при электровзрыве и взрыве ВВ удовлетворительно совмещаются при введении тротилового эквивалента электровзрыва, равного 0,3. Такие зависимости изображены на рис. 4. Здесь кривая соответствует взрыву ВВ ($\eta=1$), точки — электровзрыву (обозначения те же, что на рис. 3).

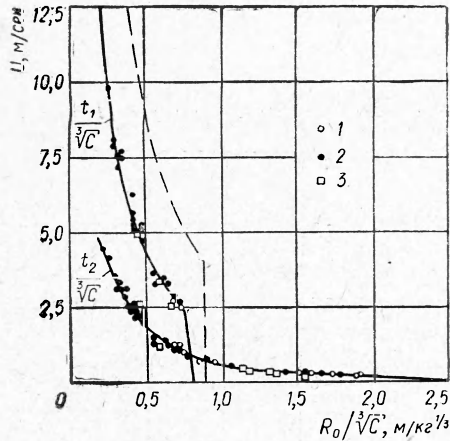


Рис. 3. Распределения массовой скорости грунта по начальной приведенной координате.

1 — $C=1.06 \cdot 10^{-3} - 1.35 \cdot 10^{-3}$ кг; 2 — $C=4.8 \cdot 10^{-3}$ кг; 3 — $C=9.0 \cdot 10^{-3} - 13.4 \cdot 10^{-3}$ кг.

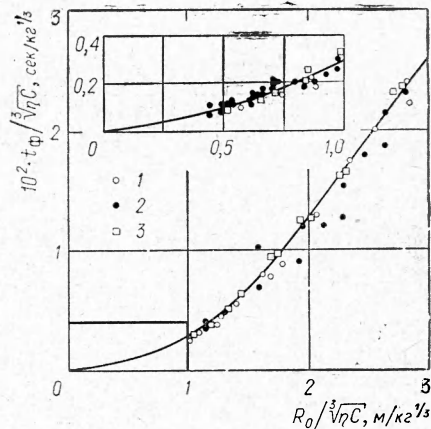


Рис. 4. Зависимость времени прихода фронта от начального расстояния до центра взрыва.

Совместить кривые максимальной массовой скорости на всем исследованном интервале расстояний путем введения постоянного тротилового эквивалента оказалось невозможным. Введение тротилового эквивалента на различных участках дает значения от $\eta=0,4$ на начальном участке до $\eta=0,22$ в конце диапазона измерений, где законы затухания максимальной массовой скорости для электровзрыва и взрыва ВВ близки. На рис. 5 показано взаимное расположение кривых при введении постоянного тротилового эквивалента $\eta=0,3$, полученного по времени прихода фронта (обозначения экспериментальных точек прежние). Максимальное расхождение кривых составляет 35%.

Зависимость максимальной массовой скорости от расстояния для электровзрыва описывается в диапазоне $0,5 \leq \frac{R_0}{\sqrt{C}} \leq 4,4$ степенным

законом:

$$U_{\phi} = 1,1 \left(\frac{R_0}{\sqrt{C}} \right)^{-2,7}, \quad (3)$$

где U_{ϕ} — максимальная массовая скорость, м/сек. На более близких расстояниях затухание слабее, что, вероятно, можно связать с конечностью времени выделения энергии и размеров разрядника.

На рис. 6 приведены в двойном логарифмическом масштабе полученные путем учета смещений распределения массовой скорости за

фронтом по эйлеровой координате $\frac{R}{\sqrt{\eta C}} = \frac{R_0}{\sqrt{\eta C}} + \frac{\Delta R}{\sqrt{\eta C}}$ для

электровзрыва (сплошные линии, $\eta=0,3$) и взрыва ВВ (штриховые линии, $\eta=1$) для двух моментов времени:

$$1 - \frac{t}{\sqrt[3]{\eta C}} = 5,23 \cdot 10^{-3} \text{ сек} \cdot \text{кг}^{-1/3};$$

$$2 - \frac{t}{\sqrt[3]{\eta C}} = 1,57 \cdot 10^{-2} \text{ сек} \cdot \text{кг}^{-1/3}.$$

Светлые квадраты — массовые скорости на фронте, полученные с кривых рис. 5, зачерненные квадраты — положение и скорость границы котловой полости при взрыве ВВ по результатам ранее опубликованной работы [9]. Движение границы котловой полости при электровзрыве не измерялось. Расхождение в величинах массовой скорости за фронтом

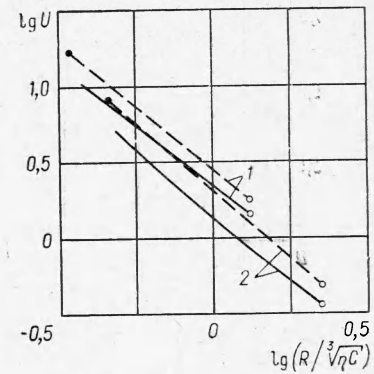
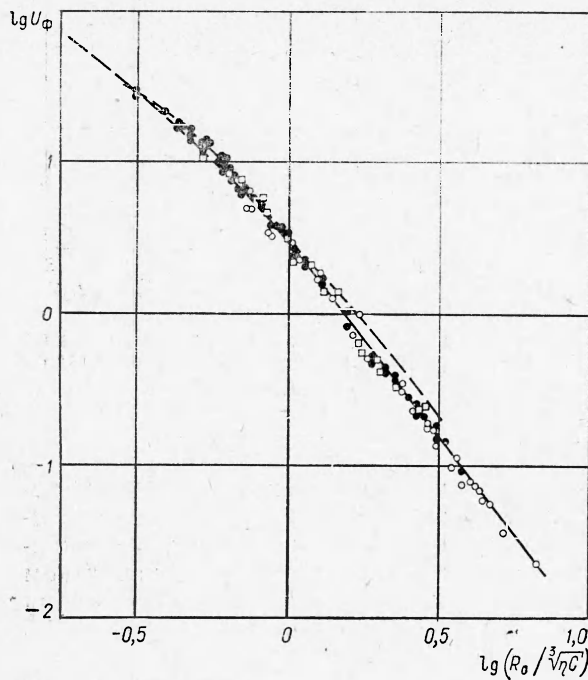


Рис. 6. Распределения массовой скорости грунта за фронтом по эйлеровой координате.

Рис. 5. Зависимость максимальной скорости от начального расстояния от центра взрыва для электровзрыва ($\eta=0,3$) и взрыва ВВ (пунктирная кривая, $\eta=1$).

практически равно расхождению скоростей на фронте, которое, как уже указывалось, не превышает 35%. Пренебрегая незначительным отклонением от параллельности кривых на рис. 6 и используя формулу (3) из работы [7], можно получить закон распределения массовой скорости по эйлеровой координате для электровзрыва

$$U = U_{\Phi} \left(\frac{R_{\Phi}}{R} \right)^n, \quad (4)$$

где U — массовая скорость грунта; R_{Φ} — координата фронта в данный момент времени.

Показатель n зависит от приведенной координаты фронта по линейному закону

$$n = 1,5 + 0,14 \frac{R_{\Phi}}{\sqrt[3]{\eta C}} = 1,5 + 0,23 \frac{R_{\Phi}}{\sqrt[3]{C}}. \quad (5)$$

