

ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА ПРИ ВЗРЫВЕ

О. С. Колков, В. И. Куликов, А. М. Тихомиров, А. Ф. Шацкевич
(Москва)

В работах [1,2] изложены результаты экспериментального исследования движения песчаного грунта при сферически симметричном камуфлетном взрыве химического ВВ и электровзрыве. Для обоих источников получена полная картина движения и проведено их сравнение. Показано, что качественно волновая картина, возникающая при электровзрыве в грунте, не отличается от картины движения при взрыве ВВ, и, более того, с определенной степенью точности эти взрывы можно считать подобными друг другу. Это делает электровзрыв удобным источником для экспериментального исследования явлений, связанных как со свойствами источника взрыва, так и с механическими свойствами грунта. Здесь сделана попытка выяснить, как влияет статическое давление на параметры движения при взрыве ВВ и электровзрыве в сухом песчаном грунте. Получены распределения массовой скорости грунта, сжатого избыточным давлением $\Delta p = 1 \text{ кг/см}^2$, по пространству, а также ее изменение во времени. Проведено сравнение с результатами, полученными для насыщенного ($\Delta p = 0$) песка.

1. Постановка эксперимента. Опыты проводились при всестороннем сжатии песка давлением около 1 кг/см^2 («упрочненный» песок). Насыпная плотность песка $\rho_0 = 1.55 \text{ г/см}^3$ и при приложении давления 1 кг/см^2 практически не изменяется. В качестве источников взрыва использовались сферические заряды ТЭНа весом 2.5 г и плотностью 1.4 г/см^3 и мощный искровой разряд (электровзрыв), создаваемый искровой разрядной установкой ИРУ, разработанной в ИФЗ АН СССР. Для сравнения использовались экспериментальные результаты, полученные ранее авторами данной работы по взрыву ВВ и электровзрыву в насыщенном песке [1,2].

Схема проведения опытов приведена на фиг. 1. Разряд происходил на дне бассейна 1 (массивной латунной плите), на торце коаксиального разрядника 2 диаметром 20 мм . Энергия, выделявшаяся на разрядном промежутке, составляла 8.5 кдж и контролировалась в каждом опыте путем осциллографирования тока и напряжения на разрядном промежутке. В работе непосредственно измерялась массовая скорость различных слоев во времени. Методика измерения основана на регистрации э.д.с., индуцированной в датчике 3 при движении его вместе с грунтом в постоянном неоднородном магнитном поле, создаваемом внешним источником. Подробнее методика описана в работе [4]. Для создания всестороннего обжатия песок помещался в резиновую оболочку 5, и воздух из оболочки откачивался. Таким образом, песок оказывался сжатым избыточным давлением около 1 кг/см^2 . Подобный пример создания внешнего давления применялся в работах ряда американских исследователей при изучении распространения плоских волн сжатия на цилиндрических песчаных образцах. Обширная библиография приведена в одной из этих работ [3].

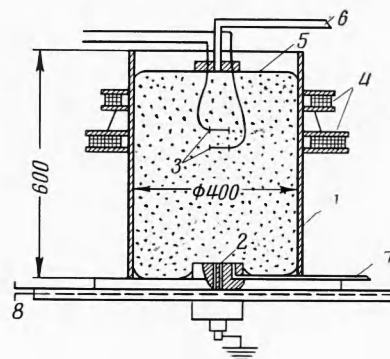
При опытах с зарядами ВВ разрядник заменялся латунной вставкой, на которую помещался заряд. В остальном условия проведения опытов сохранялись теми же, что при электровзрыве.

Эксперименты, проведенные по электровзрыву и взрыву ВВ, показали, что влияние упрочнения на движение песка проявилось значительно сильнее при электровзрыве. В связи с этим изложенные ниже результаты относятся большей частью к электровзрыву.

Для выяснения влияния на движение песка наличия воздуха в очаге электровзрыва были проведены специальные опыты. Откачка воздуха производилась из всего объема, за исключением зоны, непосредственно прилегающей к разряднику, отдельной тонкой резиновой оболочкой. Результаты этих опытов совпали с результатами, полученными при откачке всего объема.

2. Результаты эксперимента. В изложении результатов эксперимента для удобства сравнения с работами [1,2] используются приведенные расстояния $R^0 = R / C^{1/3}$ и время $t^0 = t / C^{1/3}$. Здесь R — расстояние от центра взрыва (м), t — время, отсчитываемое от момента взрыва (сек), C — удвоенный вес заряда ТНТ, эквивалентного по энергии рассматриваемому взрыву (кг). Для энергии 8.5 кдж $C = 4.08 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

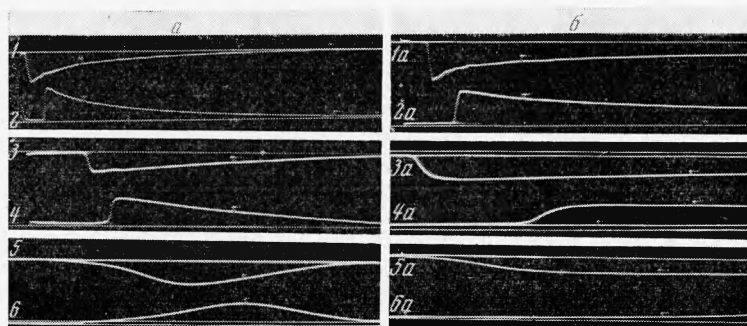
На фиг. 2 осциллограммы массовой скорости грунта для электровзрыва в упрочненном а) и насыщенном б) песке одинаковой энергии приведены для следующих начальных



Фиг. 1

расстояний R_0 датчиков от центра взрыва

| | | |
|----|--------------------|-----------------------|
| | 1 — $R_0 = 0.07$ м | 1 — $R_0 = 0.09$ м |
| | 2 — $R_0 = 0.09$ м | 2 — $R_0 = 0.11$ м |
| | 3 — $R_0 = 0.14$ м | 3 — $R_0 = 0.16$ м |
| а) | 4 — $R_0 = 0.16$ м | б) 4 — $R_0 = 0.22$ м |
| | 5 — $R_0 = 0.30$ м | 5 — $R_0 = 0.30$ м |
| | 6 — $R_0 = 0.35$ м | 6 — $R_0 = 0.35$ м |



Фиг. 2

Интервал между метками времени — 1 мсек. Сравнение осциллограмм, полученных на одинаковых расстояниях, показывает, что упрочнение песка существенно повлияло на развитие движения во времени.

Уменьшились как время нарастания массовой скорости до максимума, так и общая длительность положительной фазы скорости. По мере удаления от центра взрыва время нарастания массовой скорости до максимума растет, тогда как время ее последующего падения до нуля уменьшается. Общая длительность положительной фазы убывает с расстоянием и может быть приближенно описана формулой:

$$\tau^+ = 0.98 \cdot R_0^{-0.2} \quad (0.06 \leq R_0 \leq 0.35) \quad (1)$$

Здесь R_0 — в м, τ — в мсек.

Время прихода фронта (максимума массовой скорости) в зависимости от начального расстояния от центра взрыва приведено на фиг. 3, где 1 — электровзрыв в упрочненном песке, 2 — электровзрыв в насыпном песке. Расхождение кривых начинается практически в самом начале диапазона измерений. Приводим значения скорости распространения фронта, полученные графическим дифференцированием кривой 3, и соответствующие значения для насыпного песка:

| | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| R_0^0 (м/кг ^{1/2}) | = 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.5 | |
| D (м/сек) | = 400 | 230 | 220 | 200 | 200 | (а) |
| D (м/сек) | = 300 | 190 | 120 | 92 | 75 | (б) |

Следует, однако, отметить, что постоянство скорости при $1.0 \leq R_0^0 \leq 2.2$, полученное вследствие проведения на фиг. 3 в этом диапазоне линейной зависимости, не представляется вполне убедительным. В самом деле, на достаточном расстоянии от центра взрыва скорость распространения фронта должна выйти на постоянное значение, равное скорости звука (около 400 м/сек). Таким образом, скорость распространения фронта, достигнув некоторого минимального значения, вероятно, вновь возрастает, т. е. зависимость 1 (фиг. 3) должна иметь перегиб. Однако экспериментальный разброс не дает достаточных оснований для проведения кривой с перегибом.

На фиг. 4 приведены зависимости максимальной массовой скорости (скорости частиц на фронте) от приведенного начального расстояния от центра взрыва для электровзрыва 1 и взрыва ВВ 2. Экспериментальные точки — упрочненный песок, кривые проведены по данным работ [1,2] для насыпного песка. Как следует из фигуры, максимальная массовая скорость при упрочнении песка давлением 1 кг/см² практически не изменилась как для электровзрыва, так и для взрыва ВВ. Для сравнения характера дефор-

мирования грунта за фронтом волны в насыпном и упрочненном песке интересно построить распределения массовой скорости за фронтом по эйлеровой координате

$$R = R_0 + \Delta R$$

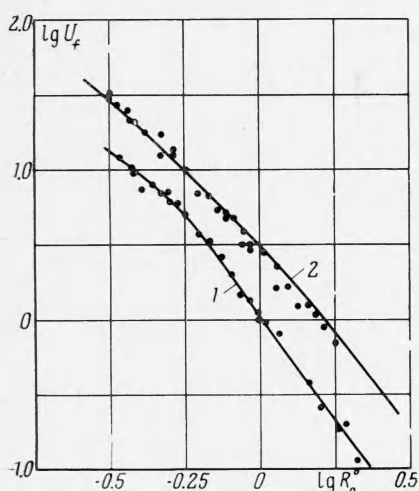
где R_0 — начальная координата датчика, ΔR — смещение. Зависимости $U(t)$ для различных R_0 получаются непосредственно из осциллограмм. Имея набор таких зависимостей, нетрудно получить распределения массовой скорости по начальной координате для различных моментов времени. Путем учета смещений осуществляется переход к распределениям массовой скорости по эйлеровой координате. Такие зависимости для трех положений фронта приведены на фиг. 5 для электровзрыва в упрочненном (сплошные линии) и насыпном (пунктир) песке. Кружки на фиг. 5 — положение фронта, проведенная по ним линия соответствует максимальной массовой скорости. Как следует из фигуры, распределения скорости за фронтом для насыпного и упрочненного песка существенно отличаются. Если закон распределения для насыпного песка стремится по мере распространения фронта к закону

$$U = U_f \left(\frac{R_f}{R} \right)^2$$

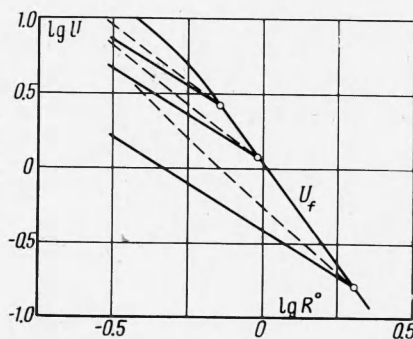
где R_f — координата фронта, то для упрочненного песка во всем исследованном диапазоне выполняется степенной закон с показателем, не зависящим от времени

$$U = U_f \left(\frac{R_f}{R} \right)^{1.25} \quad (0.3 \leq R^0 \leq R_f^0) \quad (2)$$

Наличие такого закона указывает на то, что падение плотности упрочненного песка за фронтом происходит более интенсивно по сравнению с насыпным песком.



Фиг. 4



Фиг. 5

Таким образом, даже сравнительно небольшое (1 кг/см^2) увеличение статического давления резко изменило движение грунта за фронтом взрывной волны. В то же время максимальная массовая скорость от упрочнения песка практически не изменилась.

Сравнение полученных результатов с результатами работы [4] и многочисленных работ, проведенных в последнее время С. С. Григорьяном с сотрудниками, показало, что законы затухания максимальной массовой скорости в пределах ошибок отдельных серий экспериментов достаточно хорошо совпадают, хотя сравниваемые среды (насыпной и упрочненный сухой песок, увлажненный песок, лесс, глина и мерзлый суглинок) фактически исчерпывают все разновидности мягких грунтов. Однако для объяснения этого факта требуются дальнейшие исследования.

Поступила 20 XI 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельманов И. Л., Колков О. С., Тихомиров А. М., Шацкевич А. Ф. Движение песчаного грунта при камуфлетном взрыве. Физика горения и взрыва, 1968, т. 1, № 1.
2. Зельманов И. Л., Колков О. С., Тихомиров А. М., Шацкевич А. Ф. Об электровзрыве в песчаном грунте. Физика горения и взрыва, 1968, т. 1, № 3.
3. Stroll R., Ebeido I. Shock waves in granular soil. Soil Mech. and Foundat. Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs, 1965, vol. 91, No. 4, pp. 107—125.
4. Докучаев М. М., Родионов В. Н., Ромашов А. Н. Взрыв на выброс. Изд. АН СССР, М., 1963.