

ОБ УТЕЧКЕ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ИЗ КАМУФЛЕТНОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ВЗРЫВЕ В НАСЫПНОМ ГРУНТЕ

В. И. Куликов, А. Ф. Шацкевич
(Москва)

При исследовании взрыва в насыпных грунтах имели место факты, свидетельствующие о возможности проникновения продуктов взрыва из камуфлетной полости в процессе ее развития в поры грунта. В работе [1] показано, что котловая полость развивается до максимального размера, которому соответствует по адиабате продуктов детонации конечное давление в полости, превышающее 1 атм почти в два раза. Литостатическое давление в модельных опытах [1] не превышало 0,1 атм, поэтому можно предположить, что давление продуктов в котловой полости упало до 1 атм за счет частичной утечки продуктов взрыва в поровое пространство грунта. В работе [2] приводится интересный факт о разуплотнении грунта за фронтом волны сжатия до величин, ниже начальной плотности, что безусловно должно способствовать утечке продуктов детонации в поры грунта. И, наконец, отметим, что насыпные грунты являются, естественно, пористыми (пористость достигает 40%), что требует исследования возможности «фильтрации» и ее влияния безотносительно к упомянутым выше доводам.

Если теперь считать, что «фильтрация» продуктов детонации из камуфлетной полости в пористых средах имеет место, то для ее обнаружения и оценки влияния на волну сжатия в грунте было необходимо поставить опыты, в которых утечка продуктов в поровое пространство предотвращена. Оказалось удобно проводить исследование «фильтрации» при подрыве зарядов в воздушных полостях, предварительно созданных в грунте. Если при обычном камуфлетном взрыве давление продуктов детонации достигает вначале 100 кбар, а поверхность камуфлетной полости при ее расширении увеличивается в сто раз, так как конечный размер полости около $10 R_0$ (R_0 — радиус заряда), то при подрыве заряда в сферической воздушной полости, например, с радиусом $R_1 = 6R_0$ давление продуктов взрыва не превышает 100 атм, а поверхность полости увеличивается только на порядок (начальный радиус полости — $6R_0$, конечный радиус полости — $20R_0$). Поэтому при взрыве в воздушной полости утечку продуктов удастся предотвратить с помощью нескольких слоев эластичной резины, которая выдерживает приведенные выше степени расширения полости и не разрушается при указанных давлениях. Именно этот путь, облегающий исследование «фильтрации», был выбран в данной работе.

В статье приводятся результаты модельных экспериментов, которые показывают существенность «фильтрации» при взрыве в песчаном грунте, ее влияние на массовую скорость в волне сжатия и размер конечной котловой полости. Приводятся оценки количества продуктов детонации, проникающих в поры грунта, и связанные с этим потери энергии заряда, идущей на формирование взрывной волны.

Постановка эксперимента. Опыты проводились в бассейне с сухим песком насыпной плотности $\rho_0 = 1,58 \text{ г/см}^3$. Данные ситового анализа показали, что 72% объема грунта составляют частицы размером от 0,2 до 0,3 мм. Пористость грунта — около 40%. В опытах использовались прессованные из тэна заряды весом 0,8 г с плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$, с радиусом, равным 5,13 мм. Заряды устанавливались в центре хрупких гипсовых сфер с $R_1 = 6,33 R_0$ и толщиной стенок около 1 мм или в

центре целлулоидных сфер с $R_1=3,6 R_0$. Затем сферы помещались в центр бассейна с грунтом.

В экспериментах регистрировалась скорость движения частиц грунта во времени на различных расстояниях по вертикальному вверх направлению от заряда. Применялась индукционная методика, принцип которой заключается в регистрации э. д. с., наводимой в плоской катушке-датчике, движущейся вместе с грунтом в магнитном поле. Типичные осциллограммы записи скорости и подробное описание методики приведены в работе [2].

В опытах, в которых «фильтрацию» было необходимо предотвратить, сферы с зарядом окружались резиновой оболочкой. Сферы с радиусом $R_1=6,33 R_0$ покрывались двумя слоями резиновой пленки от воздушных шаров-зондов толщиной 0,15 мм, а сферы с $R_1=3,6 R_0$ окружались пятью слоями резины. Поверх резиновой оболочки наносился миллиметровый слой пластилина, предотвращавший резину от проколов при соприкосновении с частицами грунта. Однако, как показали последующие опыты, эта предосторожность оказалась излишней.

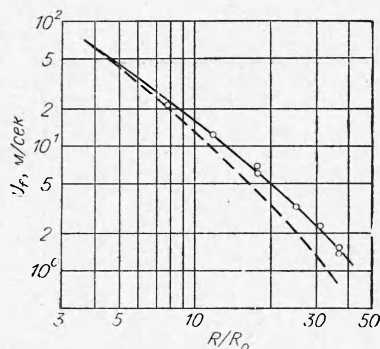


Рис. 1. Зависимость максимальной массовой скорости от расстояния для взрыва в полости с $R_1=3,6 R_0$ с резиновой оболочкой (сплошная кривая) и без нее (пунктирная кривая).

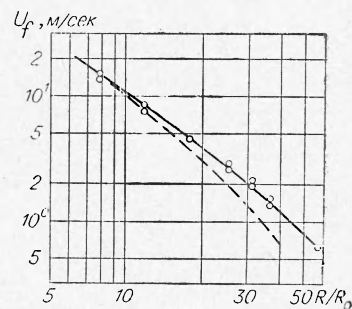


Рис. 2. Зависимость максимальной массовой скорости от расстояния для взрыва в полости с $R_1=6,33 R_0$.

Результаты экспериментов. На рис. 1 и 2 представлены зависимости максимальной массовой скорости U_f в волне сжатия от расстояния до центра заряда (центра воздушной полости). Масштаб по обеим осям логарифмический.

Сопоставление результатов, представленных на рис. 1 и 2, показывает, что введение резиновой оболочки, закрывшей поры грунта от проникновения в них газов, изменило степень затухания максимальной массовой скорости. Ввиду того, что резиновая оболочка по толщине не превышает 1 мм и не изменяет механических свойств грунта, эти результаты показывают, что утечка продуктов детонации в поры грунта происходит и существенно влияет на движение грунта при взрыве.

Для выявления механизма влияния «фильтрации» продуктов взрыва на затухание волны в грунте было проведено сопоставление осциллограмм массовых скоростей частиц грунта на различных расстояниях от центра взрыва для опытов с оболочкой и без нее. На рис. 3 представлены изменения во времени координаты частиц с лангранжевой координатой $7,8 R_0$, отсчитываемой от центра заряда, при взрыве в полости с $R_1=6,33 R_0$; на рис. 4 — массовые скорости для частиц с лангранжевой координатой $31,2 R_0$. На рис. 3 видно, что в ближней зоне взрыва утечка

продуктов детонации влияет лишь на зафронтное движение грунта, причем со временем это влияние нарастает. Такой характер проявления «фильтрации» естествен. Действительно, при взрыве в данной воздушной полости с резиновой оболочкой и без нее начальные давления продуктов взрыва будут одинаковы и определяться только начальным размером полости. Начальное давление, в свою очередь, определяет фронтовые параметры волны сжатия, излучаемой в грунт, поэтому при взрыве с «фильтрацией» и без нее максимальные массовые скорости в грунте вблизи от границы полости будут одинаковы. Однако с течением времени в опытах с «фильтрацией» давление в полости падает не только за счет расширения полости, но и за счет утечки продуктов в поры грунта, т. е. более сильно, чем в опытах без «фильтрации». Это приводит к более резкому затуханию скоростей расширения камуфлетной полости, к более резкому уменьшению скоростей частиц грунта во времени в ближней зоне при взрыве с «фильтрацией». Потому, что утечка продуктов происходит не мгновенно, различие в скоростях частиц грунта при взрыве с «фильтрацией» и без нее со временем нарастает.

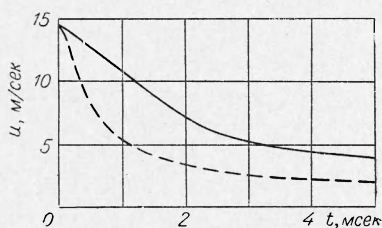


Рис. 3. Эпюры массовых скоростей частиц с лангранжевой координатой $R=7,8 R_0$ при взрыве с резиновой оболочкой и без нее.

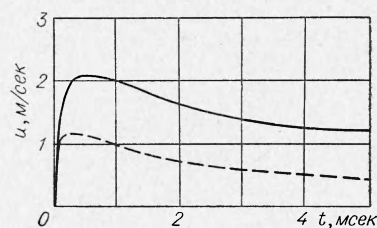


Рис. 4. Эпюры массовых скоростей частиц с лангранжевой координатой $R=31,2 R_0$.

Далее информация об изменении движения границы полости передается на фронт волны сжатия и приводит к изменению фронтовых параметров. Вследствие этого непрерывно нарастает различие в максимальных массовых скоростях, т. е. изменяется степень затухания фронтовых параметров волны сжатия. На расстояниях $40+60R_0$ от центра заряда максимальные массовые скорости в опытах без «фильтрации» почти в два раза превышают скорости в опытах с «фильтрацией». Отсюда следует, что утечка продуктов в поры грунта приводит к потерям энергии заряда, идущей на формирование волны в грунте.

Потери энергии заряда из-за «фильтрации» можно выявить из сравнения кинетических энергий, сообщаемых грунту при взрыве с резиновой оболочкой и без нее. Такой подход учитывает изменение скоростей как на фронте волны, так и за фронтом. Были подсчитаны значения кинетической энергии грунта в опытах с «фильтрацией» и без нее для различных моментов времени по формуле:

$$E = \int_{R_1}^{R_*} 2\pi \rho_0 U^2 R^2 dR,$$

где ρ — начальная плотность грунта; U — скорость частиц в лангранжевых координатах, которые были получены для различных моментов времени по результатам наших экспериментов; R_1 — радиус начальной воздушной полости; R_* — радиус вступления волны сжатия; R — лангранжевая координата. На рис. 5 представлены результаты этих вычислений для полости с $R_1=6,33 R_0$ с резиновой оболочкой и без нее в зависимости от положения вступления волны сжатия, т. е. мас-

сы грунта, охваченной движением. Кинетическая энергия отложена в процентах к энергии заряда C , вступление волны отложено в радиусах заряда.

На рис. 5 видно, что, когда волна достигает расстояний порядка $60 R_0$, кинетическая энергия грунта в опытах с утечкой продуктов в четыре раза меньше кинетической энергии грунта в опытах без утечки, поэтому для оценок можно считать, что эффективность действия заряда при взрыве с «фильтрацией» на 75% ниже, чем при взрыве без «фильтрации», т. е. утечка продуктов из полости приводит к существенному уменьшению механического действия взрыва.

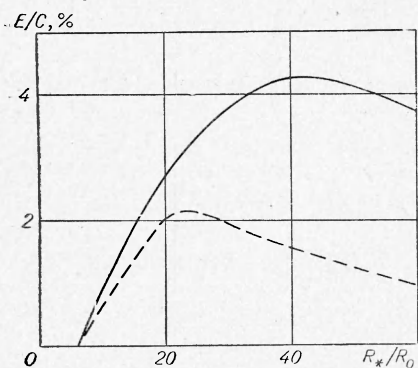


Рис. 5. Кинетическая энергия грунта в зависимости от радиуса вступления волны сжатия.

Аналогичная оценка для воздушной полости с радиусом $R_1 = 3,6R_0$ показала, что в этом случае эффективность заряда вследствие «фильтрации» продуктов детонации уменьшилась на 65%.

Была проведена оценка массы продуктов взрыва, проникающих в поры грунта за время расширения полости до ее максимального размера. Вне зависимости от режима «фильтрации» (турбулентного, ламинарного, с теплопередачей или без нее) продукты детонации, остающиеся в полости, расширяются адиабатически, т. е. для удельных объемов продуктов взрыва можно писать обычное уравнение диабаты. Очевидно, что конечное давление продуктов взрыва в полости при взрыве с «фильтрацией» и без нее одинаково, поэтому будут одинаковы и конечные удельные объемы продуктов взрыва v_k . Тогда объем конечной котловой полости в опытах с резиновой оболочкой равен

$$V_k^0 = m_0 v_k,$$

в опыте без оболочки

$$V_k = m v_k,$$

где m_0 — начальная масса продуктов взрыва в полости; m — масса продуктов взрыва, остающаяся в полости после ее расширения до максимального размера в опытах с «фильтрацией». Отсюда

$$\frac{m}{m_0} = \frac{V_k}{V_k^0} = \left(\frac{R_k}{R_k^0} \right)^3, \quad (1)$$

где R_k^0 — радиус котловой полости в опытах с оболочкой; R_k — в опытах без оболочки. Таким образом, для определения массы «фильтрующихся» продуктов необходимо знать размеры котловых полостей при взрыве с «фильтрацией» и без нее. Определение радиуса котловых полостей в опытах без резиновой оболочки велось из условия несжимаемости:

$$R^3 - R_1^3 = (R + \Delta R)^3 - R_k^3,$$

где R_1 — радиус начальной воздушной полости; R — лангранжевая координата слоя; ΔR — конечное смещение слоя с лангранжевой координатой R , которое вычислялось по эпюрам массовой скорости; R_k — конечный размер котловой полости. При этом, чтобы исключить влияние отраженных от стенок бассейна волн, дополнительно были проведены опыты с зарядами весом 0,2 г. Результаты этих опытов для полостей без резиновой оболочки представлены на рис. 6. По оси абсцисс отложен ра-

диус начальной воздушной полости R_1 в радиусах заряда, по оси ординат — радиус конечной котловой полости R_k — также в радиусах заряда. По этим экспериментальным значениям проведена пунктирная кривая.

Конечные размеры котловых полостей при взрыве с резиновыми оболочками получены не были ввиду того, что длительность положительной фазы волны сжатия в этом случае более чем в два раза выше длительности волны при взрыве без оболочки, вследствие чего развитие котловой полости не успевает закончиться к моменту прихода отраженных волн. Радиусы котловых полостей при взрыве без утечки газов были рассчитаны в предположении адиабатического расширения продуктов взрыва до 1 атм. Предположение это является естественным, так как высота столба засыпки грунта над зарядом не превышала 500 мм. При расчете начальное давление продуктов взрыва оценивалось по уравнению состояния продуктов детонации гексогена, предложенному в работе [3]. Результаты этого расчета представлены сплошной кривой на рис. 6. Отметим, что зависимости радиуса полости от времени и скорости границы полости от ее радиуса, построенные для опытов с резиновой оболочкой до момента прихода отраженных волн, хорошо экстраполируются к расчетным значениям.

По формуле (1) и экспериментальным значениям котловых полостей при взрыве с «фильтрацией» и расчетным значениям, которые соответствуют опытам без «фильтрации», была проведена оценка массы продуктов взрыва, остающихся в полости при взрыве без оболочки. Результаты расчета приведены на рис. 7, где по осям отложены радиус начальной воздушной полости в радиусах заряда и отношение массы оставшихся в полости продуктов m к начальному значению m_0 . В частности, при взрывах в начальных воздушных полостях с радиусами $3,6R_0$ и $6,33R_0$ из полости в грунт «фильтруется» соответственно 77 и 79% продуктов детонации.

Ввиду того, что при взрыве в воздушной полости с радиусом $R_1=6,33R_0$ давление продуктов взрыва не превышает 100 атм, настоящие экспериментальные результаты показывают, что утечка продуктов детонации из полости существенна вплоть до десятков атмосфер.

Масштабный эффект экспериментально не проверялся, однако если считать, что скорость истечения газов определяется давлением в полости и проницаемостью грунта, то масса «фильтрующихся» продуктов будет пропорциональна поверхности «фильтрации», т. е. радиусу полости в квадрате, и времени расширения полости. Но $r \sim C^{1/3}$ и $t \sim C^{1/3}$ следовательно, масса «фильтрующихся» продуктов будет пропорциональна весу заряда C .

В опытах с резиновой оболочкой и без нее в грунт излучаются волны одинаковой амплитуды и различной полноты, что видно из рис. 3,

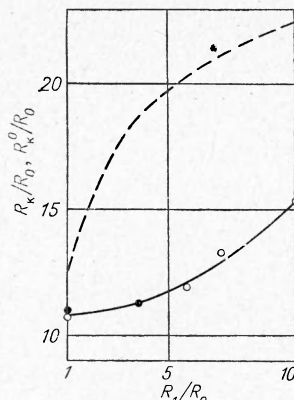


Рис. 6. Зависимость радиуса конечной котловой полости от ее начального радиуса.

● — заряд весом 0,8 г;
○ — заряд весом 0,2 г.

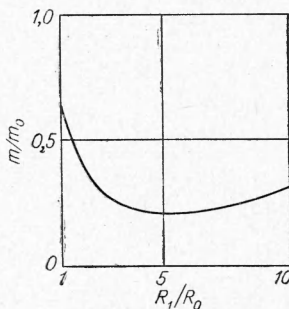


Рис. 7. Доля оставшихся в полости продуктов взрыва в зависимости от размера начальной воздушной полости.

