

МЕХАНИЗМ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛМОВ НА ДНЕ ВОРОНКИ ПРИ ВЗРЫВАХ НА ВЫБРОС

И. М. Блинов

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, blinov@gdd.ch70.chel.su

Изложены результаты исследований по выявлению условий и объяснению механизма образования холмов на дне воронки при взрывах на выброс. Исследования проведены при моделировании крупномасштабных взрывов на вакуумной установке. Приведены размеры холмов в зависимости от глубины заложения заряда.

Ключевые слова: взрыв на выброс, холмы на дне воронки, механизм и условия образования холмов.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа продолжает исследования [1–3], посвященные вопросам моделирования одиночных и групповых взрывов на выброс под горизонтальной поверхностью с помощью микровзрывов взрывчатого вещества (ВВ) (массой $m = 0,2$ г).

В процессе исследования влияния внешнего давления воздуха p_0 на размеры и форму воронки было замечено, что в области давлений $p_0 \approx 6$ кПа на дне воронки в сухом песке и песчано-масляной среде при взрывах заряда на отдельных глубинах появляются холмы.

При $p_0 < 0,6$ кПа, т. е. в области давлений, где обеспечивается моделирование крупномасштабных взрывов, холмы регулярно возникают практически на всех глубинах взрыва, когда образуется воронка выброса (рис. 1). Радиус основания холма r_x и его высота h_x зависят от глубины взрыва W и давления воздуха p_0 . На рис. 2 показана зависимость безразмер-



Рис. 1. Воронка, образованная при взрыве в сухом песке ($p_0 = 0,13$ кПа)

ных радиуса и высоты холмов от глубины заложения заряда. Наблюдается два максимума значений радиуса и высоты на относительных глубинах $\bar{W}_1 = 0,4$ и $\bar{W}_2 = 1,35$, что соответствует абсолютным значениям глубин заложения $W_1 = 6$ см и $W_2 = 17$ см для заряда массой ВВ $m = 0,2$ г. Холмы малы или совсем отсутствуют при взрывах на глубине $\bar{W}_3 = 0,85$, что соответствует оптимальной глубине заложения заряда, при которой образуется воронка максимального объема. Абсолютное значение оптимальной глубины заложения $W_3 = 12$ см.

В работах [4–6] также упоминается о воз-

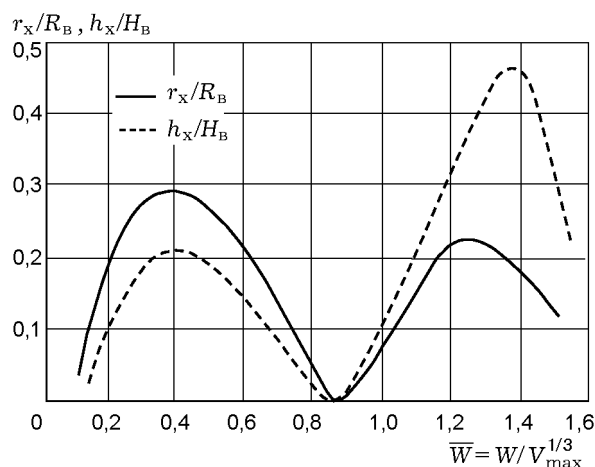


Рис. 2. Зависимость размеров холмов на дне воронки от глубины взрыва в сухом песке при $p_0 = 0,13$ кПа:

R_B, H_B — радиус и глубина воронки относительно первоначальной свободной поверхности; W — глубина залегания заряда; V_{\max} — наибольший объем воронки, которая может быть получена при взрыве одиночного заряда данной мощности под горизонтальной поверхностью

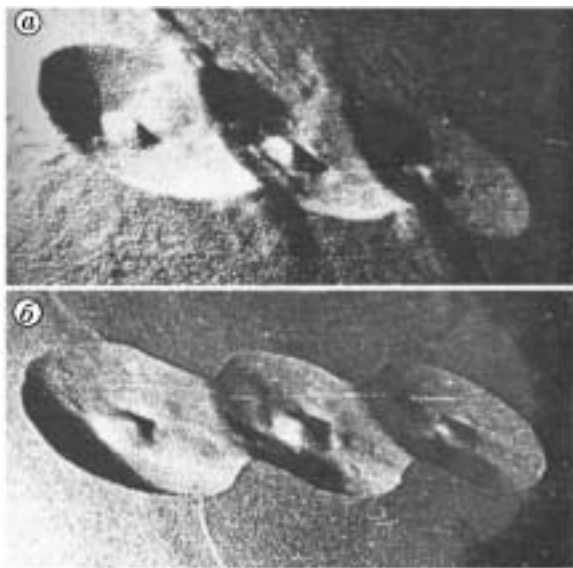


Рис. 3. Траншея в сухом песке, полученная при моделировании взрыва с тремя ядерными зарядами в бассейне рек Печора — Колва:

а — до удаления навала грунта с первоначальной свободной поверхности; *б* — после удаления навала грунта

никновении холмов на дне воронки. Так, например, в работе [4] при моделировании ударных кратеров, существующих на лунной поверхности, с помощью взрыва в песке мелкозаглубленного заряда ВВ отмечается, что при определенном заглублении образуется воронка с «центральной горкой», состоящей из хаотически перемешанных материалов выброса, упавших обратно в воронку. Подобные же воронки получают в лабораторных условиях и при ударе частиц (ударников) в мишень, представляющую собой слой рыхлого зернистого несвязного материала, лежащего на материале с большей прочностью [5]. Появление холмов на дне воронки было замечено также при изучении особенностей образования провальных воронок в песке [6].

В отдельных случаях при строительстве каналов в песчаных и водонасыщенных грунтах на дне траншеи также возникали возвышения над местом установки зарядов. При проведении ядерного взрыва в 1971 г. с тремя линейно расположенными зарядами мощностью 15 кт тротилового эквивалента [7] на трассе предполагаемого Печоро-Колвинского канала зафиксировано появление «трех островов» внутри выемки. Появление «островов» было предсказано при моделировании этого ядерного взрыва (рис. 3).

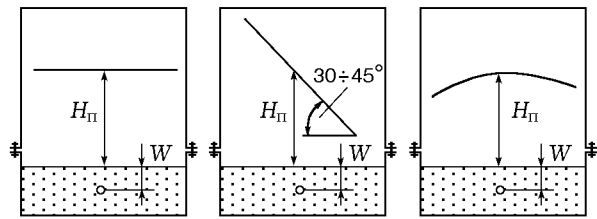


Рис. 4. Схема постановки опытов по определению влияния формы и высоты потолка камеры на размеры и профиль воронки

В работе [8] не только говорится об эффекте вспучивания при проведении натуральных взрывов в грунтах с близким расположением грунтовых вод, но и делается попытка дать объяснение этому «аномальному эффекту».

1. Холмы образуются «за счет сползания разжиженного грунта с бортов воронки к центру выемки с последующим выпором грунта после столкновения».

2. Вспученная зона образуется из-за возвратного движения нагруженного взрывом нижележащего грунта (ила), неспособного к дальнейшему уплотнению (выдавливанию).

3. Явление аномального эффекта связывается с падением некоторого объема грунта обратно в воронку, величина которого существенно растет из-за искривления траекторий движения частиц грунта к оси симметрии в тяжелых водонасыщенных грунтах.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При изучении взрыва на выброс на вакуумной установке также было высказано несколько предположений о причинах, которые могли способствовать появлению холмов. Некоторые из них были проверены экспериментально.

1. Образование холмов за счет частиц грунта, отраженных от потолка и упавших обратно в воронку (рис. 4). Однако опыты, проведенные при атмосферном давлении и в вакууме с различными расстояниями от свободной поверхности грунта до потолка ($H_{\text{п}} = 0,15 \div 2,5$ м) разной формы, показали, что в обоих случаях размеры и профиль воронок с уменьшением высоты свободного полета существенно не изменились. Холмы в вакууме образуются, а при атмосферном давлении отсутствуют.

2. Образование холмов за счет осыпания бортов воронки. Осыпающиеся с боковой по-

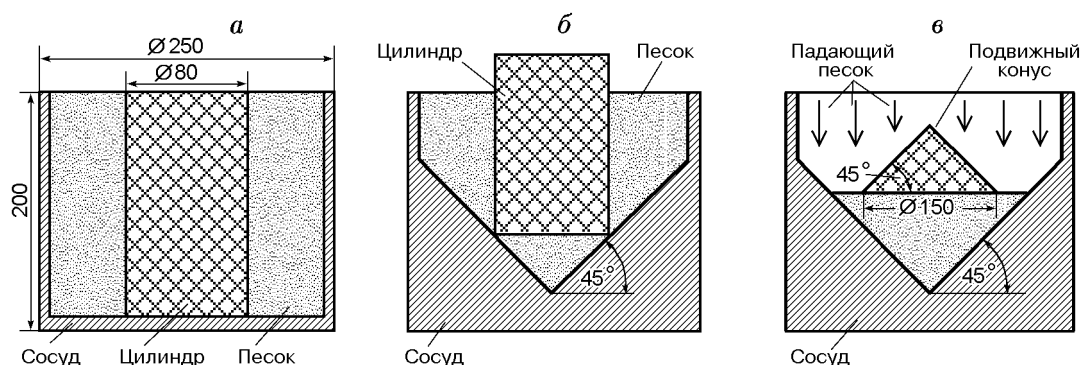


Рис. 5. Схема проведения испытаний по изучению механизма образования холмов за счет осыпания грунта

верхности воронки песчинки в процессе формирования воронки сталкиваются в центре и образуют холм. Рассматривалось три случая. Первый — осыпание происходит в тот момент, когда воронка еще не сформировалась и имеет вертикальные стенки. Такая ситуация реализуется при больших глубинах взрыва. Второй — воронка почти сформировалась и имеет форму конуса. Такая картина наблюдается при мелкозаглубленных взрывах. Для первого и второго случаев (рис. 5, а, б) осыпание бортов воронки зависело от профиля стенок сосуда с песком, из которого извлекался пластмассовый цилиндр. При этом скорость извлечения цилиндра составляла от нескольких сантиметров в секунду до 10 м/с. В третьем случае (рис. 5, в) осуществлялось равномерное скольжение падающего песка по всей конической поверхности, имитирующей форму воронки. Скорость скольжения изменялась за счет высоты падения песка, которая варьировалась в диапазоне 0,1 ÷ 1,5 м. Регулирование высоты расположения подвижного конуса позволяло изменять поток падающего песка, т. е. условия были выбраны близкими к тем, которые реализуются в модельных опытах. В результате исследований выяснилось, что и в этих условиях холмы не возникают.

Для понимания механизма образования холмов определялась их структура. Нужно было установить, какое положение занимали частицы, образующие холм, до взрыва. С этой целью было проведено несколько опытов в сухом песке с использованием меченых реперов в виде ярко окрашенных мраморных частиц размером $\approx 1,5$ мм, каждая из которых имела свой номер. Кроме того, отдельные области массива песка были окрашены в разные цвета. После взрыва с

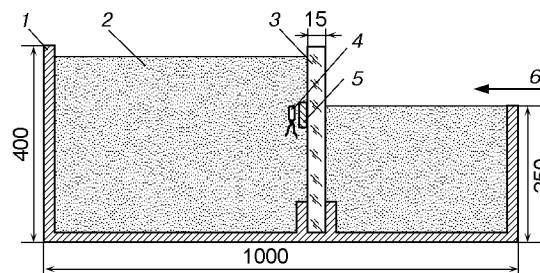


Рис. 6. Схема проведения взрывов у прозрачной стенки:

1 — емкость, 2 — песок, 3 — оргстекло, 4 — заряд, 5 — металлическая пластина, 6 — направление съемки

помощью пылесоса последовательно снимались слои песка и определялось положение реперов.

Установлено, что в основном холмы образованы частицами из ближней зоны, расположенной ниже заряда. Примененный метод меченых реперов позволил определить состав холмов, но не внес ясности в понимание механизма их образования.

Чтобы понять и объяснить, почему частицы из внутренней подзарядной полости падают на дно воронки позже других и как это происходит, нужно было изучить динамику процесса выброса «изнутри». Решение этой задачи оказалось возможным с использованием методики, примененной в работах [9, 10]: подрыв заряда осуществлялся у жесткой прозрачной стенки, а развитие процесса выброса снималось скоростной кинокамерой.

ПРОЦЕСС ВЫБРОСА ПРИ ВЗРЫВАХ У ПРОЗРАЧНОЙ СТЕНКИ

Схема постановки опытов с использовани-

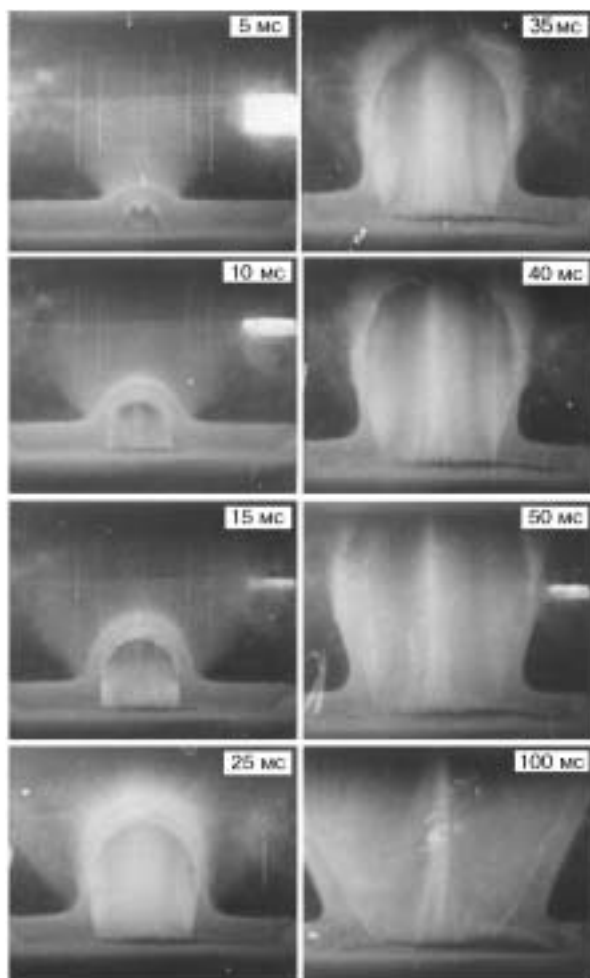


Рис. 7. Взрыв заряда ($m = 0,2$ г) у прозрачной стенки в сухом песке ($W = 6,5$ см; $p_0 = 0,13$ кПа): здесь и далее на фотографиях указано время с момента подрыва заряда

ем скоростной киносъемки показана на рис. 6.

Большинство опытов проводилось на глубинах $W = 6 \div 7$ см ($\bar{W} = 0,4$). При таких глубинах и в условиях отсутствия границы раздела (стенки из оргстекла) были получены холмы наибольших размеров (см. рис. 2). Очевидно, что наличие границы раздела будет вносить количественные искажения в результаты опытов. Однако многие качественные стороны исследуемого явления становятся доступными для изучения за счет эффекта «разреза». Съемка велась в диапазоне скоростей $1000 \div 2500$ кадр/с. Опыты проводились в сухом песке, чугунных опилках, измельченной мраморной крошке, а также в слабосвязанном грунте — уплотненной песчано-масляной среде, содержащей 3 % вакуумного масла.

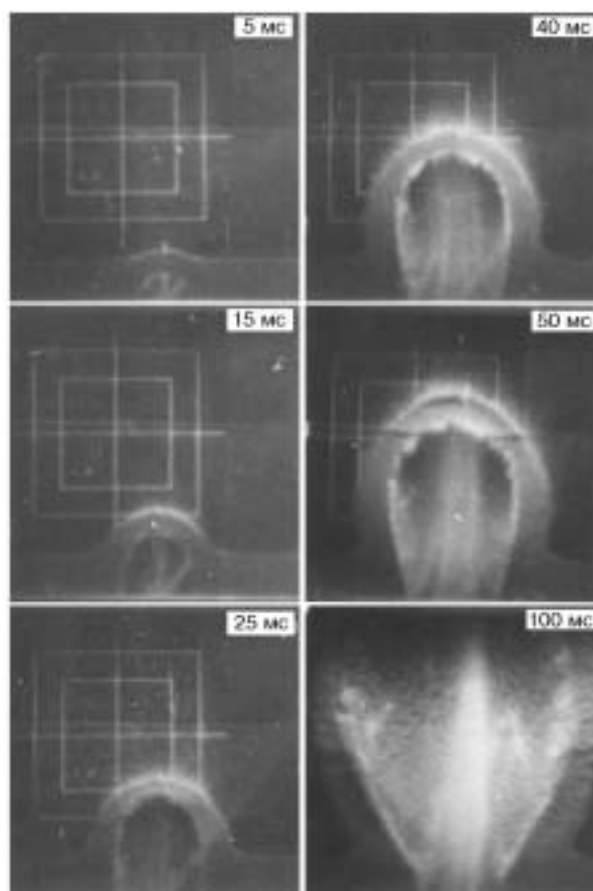


Рис. 8. Взрыв заряда ($m = 0,2$ г) у прозрачной стенки в песчано-масляной среде ($W = 6,5$ см; $p_0 = 0,13$ кПа)

На кинокадрах (рис. 7) показаны последовательные стадии взрыва на глубине $W = 6,5$ см в сухом песке при давлении в камере $p_0 = 0,13$ кПа. Из кинограммы видно, что с момента времени $\tau \approx 10$ мс после взрыва в нижней части котловой полости начинается движение песка вверх. С развитием процесса в это движение вовлекается все большая масса песка, в том числе и с боковой поверхности развивающейся котловой полости. В последующем движущаяся первоначально в виде облака масса песка концентрируется к оси полости и формируется в струю. Момент образования струи совпадает с моментом разрыва купола ($\tau = 35 \div 40$ мс). Имея большую скорость, струя опережает купол и поднимается значительно выше остальной разлетающейся массы песка. Находясь, как правило, на оси симметрии развивающейся полости, струя после потери скорости падает обратно на дно воронки, образуя посередине холм.

В опытах в песчано-масляной среде (рис. 8) контуры котловой полости, внутренней поверхности купола, начальная стадия движения слоев грунта внутри полости и формирование струи просматриваются более отчетливо и наглядно.

Таким образом, кинограммы, представленные на рис. 7, 8, дают наглядную картину развития процесса выброса и образования холмов.

Движение песка с внутренней подзарядной части котловой полости и образование струи можно объяснить следующим образом. После того, как волна сжатия выходит на свободную поверхность, в сторону полости по песку, а затем и по продуктам взрыва в полости идет волна разрежения, которая в дальнейшем способствует падению давления в ней. По достижении волной разрежения нижней части котловой полости оттуда под действием избыточного давления газов, проникших в грунт, начинается движение песчинок снизу вверх. Падению давления в полости и, соответственно, вовлечению в движение дополнительного количества песка как с боковой, так и с нижней поверхности котловой полости способствует, по-видимому, и просачивание газов через стенки (свод) купола.

Образование же струи объясняется локальным разрывом свода купола в верхней его части и, кроме того, направленным истечением оставшихся продуктов взрыва, увлекающих за собой песчинки в этот разрыв и формирующих из них струю. После этого становится понятен и эффект значительного опережения струей движущегося свода купола. Увлекаемые газом песчинки приобретают бóльшую скорость по сравнению со скоростью купола, который после разрыва практически движется по инерции. Как правило, разрыв купола происходит по оси симметрии в верхней части, где его толщина почти всегда меньше. Если разрыв купола происходит не строго в полюсе, то и струя может отклоняться от оси, а холмы, соответственно, располагаться не посередине воронки.

Приведенное объяснение образования струи подтверждается результатами опытов, в которых искусственно задерживался момент прорыва купола с помощью нескольких слоев полиэтилена, укладываемых в песке на разных расстояниях от заряда, и исключался кумулятивный эффект движения песка со сферической поверхности нижней части

котловой полости за счет жесткой подложки, устанавливаемой под зарядом.

Дополнительным доказательством того, что песок в полости движется за счет создавшегося перепада давлений и в дальнейшем захватывается истекающими газами, являются результаты лабораторных опытов с прозрачными сосудами, частично заполненными сухим окрашенным песком. Сосуды герметизировались мембраной при атмосферном давлении и устанавливались в вакуумную камеру, т. е. первоначальное значение давления в сосуде всегда было равно атмосферному.

При достижении заданного давления в камере мембрана разрушалась взрывом нихромовой проволоочки, контактирующей с мембраной. Регистрация процесса проводилась визуально и с помощью киносъемки. Движение и выброс песка наблюдались только тогда, когда разность давлений внутри и вне сосуда (p_c и p_0 соответственно) превышала некоторое критическое значение, т. е. $(p_c - p_0) \geq \Delta p_{кр}$. В проведенной серии опытов $\Delta p_{кр} \geq 50$ кПа. Скорость и высота подъема песка также зависят от величины перепада давлений.

Образование холмов зависит от свойств грунта и масштаба взрыва. Их нет, например, при проведении модельных опытов в чугунных опилках и измельченной мраморной крошке. Отснятые кинограммы опытов с этими средами показали, что никакого движения частиц внутри полости не наблюдается до момента разрушения купола. Не замечено концентрации частиц при разлете и их обратном падении. Причина здесь, видимо, в том, что исследуемые среды состоят из более крупных и тяжелых частиц, чем песчинки, и остаточного давления газа в полости недостаточно для того, чтобы вовлечь их в движение.

Насыпная плотность и размеры частиц для сухого песка, мраморной крошки и чугунных опилок в опытах составляли соответственно:

$$\begin{aligned} \rho_{с.п} &= 1,45 \text{ г/см}^3, & l_{с.п} &= 0,6 \div 0,1 \text{ мм}; \\ \rho_{мр.кр} &= 1,4 \text{ г/см}^3, & l_{мр.кр} &= 5 \div 0,5 \text{ мм}; \\ \rho_{ч.о} &= 3,8 \text{ г/см}^3, & l_{ч.о} &= 1 \div 0,2 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Этот вывод подтверждается кинограммой взрыва в чугунных опилках с небольшим количеством песка, размещенного в области заряда (рис. 9). На черном фоне движущихся чугунных опилок контрастно выделяются песчинки,

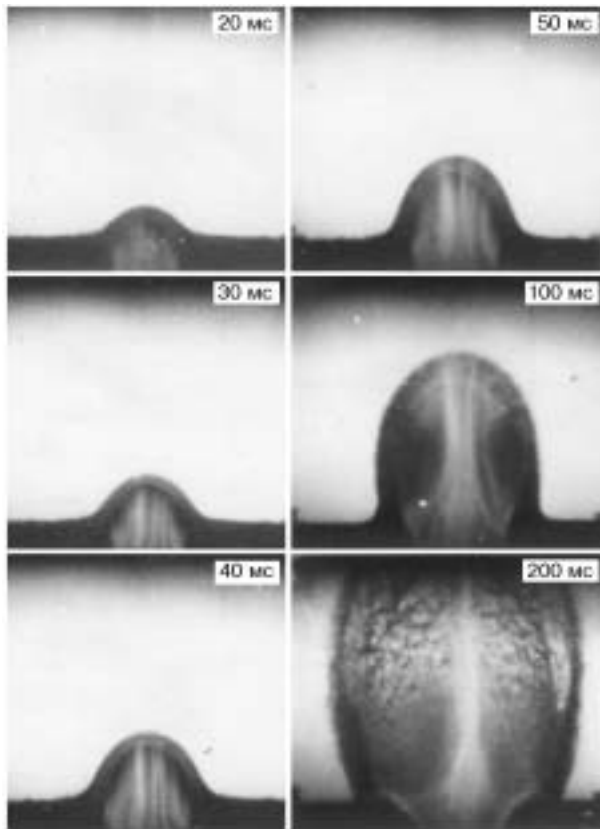


Рис. 9. Взрыв заряда ($m = 0,2$ г) у прозрачной стенки в чугунных опилках с сухим песком в ближней зоне взрыва ($W = 6,5$ см, $p_0 = 0,13$ кПа)

поднимающиеся вверх и формирующиеся затем в струю.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА ОБРАЗОВАНИЕ ХОЛМОВ

Для того чтобы выяснить, почему не образуются холмы в воздухе при $p_0 > 6$ кПа, были сняты взрывы при различных давлениях в камере. Внешнее давление влияет на скорость развития этого процесса: при больших давлениях он развивается медленнее, при малых — быстрее.

На рис. 10 показаны моменты взрыва при $p_0 = 8$ кПа в сухом песке ($W = 6,5$ см). Сравнение кинограмм (см. рис. 7 и 10) показывает, что при $p_0 = 8$ и $0,13$ кПа имеются принципиальные различия в процессе развития выброса. Если при $p_0 = 0,13$ кПа с нижней границы полости песок движется вверх и затем формируется в струю, то при больших давлениях наблюдается практически обратная картина. С

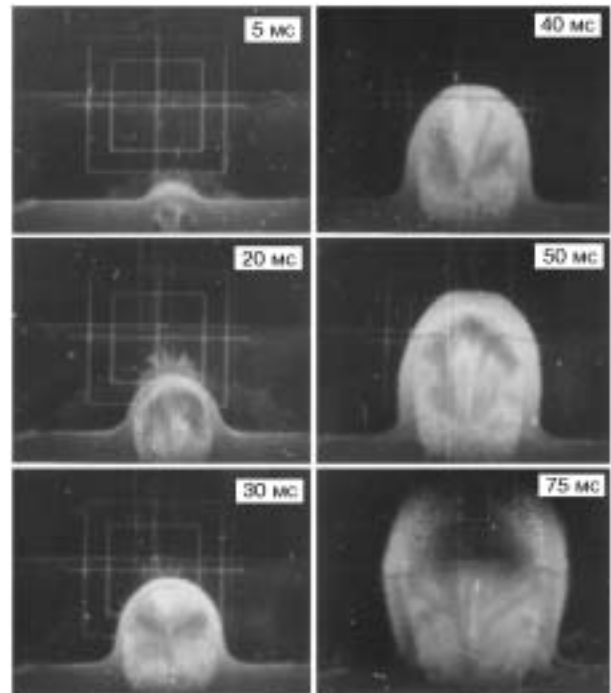


Рис. 10. Взрыв заряда ($m = 0,2$ г) у прозрачной стенки в сухом песке ($W = 6,5$ см, $p_0 = 8$ кПа)

нижних слоев центральной зоны расширяющегося купола песок перемещается вниз во внутрь полости. И происходит это как бы в два приема. В первый раз отрывается небольшая масса песка, через некоторое время наблюдается начало повторного выброса более значительного количества. При больших давлениях это происходит на более ранних стадиях и быстрее, чем при меньших. Например, первый бросок песка в полость после начала взрыва при $p_0 = 8$ кПа начинается примерно через 15 мс, тогда как при $p_0 = 100$ кПа — через 5 мс (рис. 11). Повторный отрыв песка с купола происходит примерно через такие же интервалы времени после первого — через 30 и 10 мс соответственно.

Проанализируем, чем это обусловлено. В процессе развития взрыва с момента прихода волны разрежения, а также охлаждения и утечки продуктов взрыва сквозь свод купола наружу давление в полости быстро падает и наступает момент, когда внутри полости оно становится меньше, чем снаружи. Увеличение же размеров купола в дальнейшем происходит уже не за счет газового подпора, а по инерции. Свод купола при этом становится все более газопроницаемым, и наружный воздух, проникая в полость через разрыхленный свод, вначале оста-

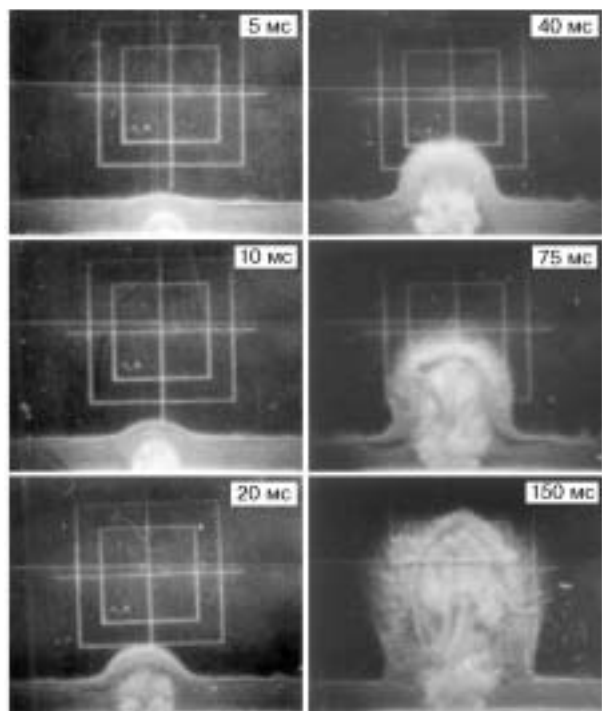


Рис. 11. Взрыв заряда ($m = 0,2$ г) у прозрачной стенки в сухом песке ($W = 6,5$ см, $p_0 = 100$ кПа)

навливают, а затем увлекает за собой песок с внутренних слоев купола. Раньше и интенсивнее, как и следовало ожидать, это происходит в полюсе купола. Здесь он более пористый, и, кроме того, в этом месте создается локальная зона повышенного давления за счет скоростного напора. Основной причиной отсутствия холмов при взрывах модельных зарядов в камере с недостаточной степенью разрежения является наличие сопротивления воздуха, даже если оно и невелико. Холмы могут образоваться только в том случае, если давление под сводом купола будет постоянно превышать наружное, вплоть до самого момента его разрыва, а перепад давлений будет не меньше некоторого критического значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования получены экспериментальные данные, качественно объясняющие появление холмов на дне воронок и раскрывающие механизм их образования в непрочных средах (типа песка).

Отмечается, что при взрывах в вакууме внутри котловой полости формируется

струи из раздробленного грунта, поднимающаяся вверх с большей скоростью, чем разрушенный, разлетающийся свод купола. При обратном падении струи на дне воронки образуется холм. Формирование струи осуществляется за счет истечения газообразных продуктов взрыва через разрыв в полюсе купола, увлекающих за собой движущиеся вверх под действием избыточного давления мелкие частицы грунта с нижней части поверхности котловой полости.

Установлено, что холмы на дне воронки могут образоваться в случае, если:

- взрыв заглубленный, но проводится не в области оптимальных глубин заложения;
- давление под сводом купола постоянно превышает наружное вплоть до самого момента разрыва купола, а перепад давлений не меньше некоторого критического значения $\Delta p_{кр}$;
- среда обладает незначительной прочностью или при взрыве происходит достаточно мелкое дробление породы, отдельные кусочки которой могут быть вовлечены в движение внутри котловой полости продуктами взрыва и затем сформироваться в струю.

В натуральных промышленных взрывах все перечисленные условия одновременно реализуются не часто. Поэтому холмы в реальных условиях встречаются довольно редко.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрамеев Ю. С. Физические основы приближенного моделирования взрывов на выброс // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 123–130.
2. Блинов И. М., Вахрамеев Ю. С. Способ моделирования крупных взрывов на выброс микровзрывами ВВ // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 102–109.
3. Блинов И. М., Вахрамеев Ю. С. Изучение образования траншей при групповых взрывах с линейно расположенными зарядами // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 3. С. 76–82.
4. Обербек В. Р. Лабораторное моделирование ударного кратерообразования при помощи взрывчатых веществ // Механика: Сб. статей. № 12: Механика образования воронок при ударе и взрыве / Под ред. А. Ю. Ишлинского, Г. Г. Черного. М.: Мир, 1977. С. 33–61.
5. Квайд У. Л., Обербек В. Р. Определение мощности поверхностного слоя ВВ по лунным ударным кратерам // Там же. С. 86–127.
6. Адушкин В. В., Перник Л. М. Особенности образования провальных воронок // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 18, № 4. С. 541–552.

7. **Литвинов Б. В.** Атомная энергия не только для военных целей. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. С. 224–229.
8. **Камалян Р. З.** Об одном эффекте, возникающем при взрыве на выброс // Материалы Всесоюз. конф. «Действие взрыва в грунтах и горных породах». Киев: Наук. думка, 1982. С. 208–213.
9. **Садовский М. А., Адушкин В. В., Родионов В. Н., Старцев Г. Н.** Об одном способе моделирования крупных взрывов на выброс // Физика горения и взрыва. 1967. Т. 3, № 1. С. 119–127.
10. **Иванов Б. А.** О механизме действия взрыва вблизи поверхности грунта // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 1. С. 110–114.

Поступила в редакцию 7/VII 2004 г.
