

УДК 622.235.5

СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРУПНЫХ ВЗРЫВОВ НА ВЫБРОС МИКРОВЗРЫВАМИ ВВ

И. М. Блинов, Ю. С. Вахрамеев

*Всероссийский НИИ технической физики,
454070 Снежинск*

На основе изложенной ранее теории о приближенном подобии подземных взрывов с выбросом грунта создана методика лабораторного моделирования этого явления с помощью микровзрывов ВВ. Описана экспериментальная установка и приведены результаты опытов, обосновывающих выбор имитатора грунта, и опытов по изучению роли атмосферного давления при разных масштабах явления. Дана интерпретация результатов путем сравнения с крупными натурными взрывами и итогами теоретических исследований.

Настоящая работа продолжает начатую в [1] тему о взрывах с выбросом грунта, где изложены физические основы приближенного моделирования крупных взрывов на выброс в лабораторных условиях с помощью микровзрывов ВВ. В [1] выявлены основные факторы, определяющие размеры видимой воронки (в том числе слабое влияние прочности) и построен набор безразмерных комбинаций, постоянство которых — условие подобия картины выброса:

$$h = h/V_{\max}^{1/3}, \quad \bar{p}_0 = p_0/(\rho_0 g V_{\max}^{1/3}), \quad \bar{\tau} = \tau/(\rho_0 g V_{\max}^{1/3}), \quad \bar{\alpha}. \quad (1)$$

Здесь h — глубина заложения заряда; p_0 — давление воздуха; τ — прочность среды; $\bar{\alpha}$ — эффективный коэффициент внутреннего (сухого) трения; ρ_0 — плотность; V_{\max} — максимальный объем видимой воронки, получаемой при оптимальном заглублении данного заряда в данной среде с горизонтальной поверхностью.

Величина V_{\max} для натурального взрыва вычисляется по приведенной в [1] формуле (12) $V_{\max}^{1/3} = C(E_0/\rho_0)^{1/3,6}$, где коэффициент C зависит от типа грунта и вида взрыва (обычный или ядерный).

С уменьшением мощности взрыва роль параметров p_0 и τ возрастает. Для их сохранения лабораторные опыты следует проводить в атмосфере с пониженным давлением, а в качестве грунта использовать сыпучее или слабопрочное вещество.

В данной статье описана экспериментальная вакуумная установка и приведены результаты опытов, обосновывающих выбор имитатора грунта. Изучена роль атмосферного давления при взрывах разного масштаба. Дана интерпретация результатов путем сравнения их с натурными взрывами и с итогами теоретических исследований. Показано, что полученная при обработке крупных взрывов в аллювии предельная (для $p_0 = 0$) зависимость $V_{\max}^{1/3} = C_a(E_0/\rho_0)^{1/3,68}$ хорошо применима и для описания опытов с микровзрывами в уплотненном песке. На основе этих результатов уточнен показатель степени в законе убывания кинетической энергии при расширении полости, который, как показано, не зависит от свойств грунта. Заново интерпретирована эмпирическая формула Глосмана для размеров камуфлетной полости при ядерных взрывах в разных породах.

Экспериментальная установка

Основной элемент установки — вакуумная камера: стальной цилиндр диаметром (высотой) 2,2 и длиной 3,2 м с толщиной стенок 10 мм. Внутри цилиндра на колесах перемещается металлическая емкость размером $3 \times 1,1 \times 0,6$ м, заполняемая исследуемым грунтом. В камере имеются гермовводы для подрывного кабеля, кабеля освещения и датчика давления, которое можно регулировать от 13 Па до атмосферного. Через смотровые окна процесс взрыва регистрируется с помощью высокоскоростной киносъемки.

Источником взрыва служат заряды ВВ массой 0,2 г. Размеры воронки и навала измеряли в нескольких сечениях по двум ортогональным направлениям. Погрешность измерения ± 1 мм. Размеры выемки на уровне первоначальной (дневной) поверхности определяли после аккуратного удаления грунта специальным скребком, а объем выемки находили путем ее засыпания тем же веществом из мерных сосудов. Если опыты проводили в рыхлящейся среде, то перед установкой заряда ее уплотняли до определенной плотности ручным винтовым прессом. Заданное усилие прессования контролировали. Однородность по глубине достигалась послойным пресованием через каждые 10–15 см.

Выбор имитатора грунта

Основным объектом моделирования предполагались взрывы мощностью 100 кт. В соответствии с условием $p_0^M = p_0^N (E_0^M / E_0^N)^{1/3,6} \geq 5 \cdot 10^{-4}$ выбрано давление в камере $p_0^M = 0,05$ кПа (здесь индексы м и н соответствуют модели и натуре). Дальнейшие опыты показали, что точно выдерживать p_0^M не обязательно. При изменении давления от 13 до 650 Па результаты практически не меняются.

Первые лабораторные опыты проводили в насыпном песке с плотностью $\rho_0 = (1,45 \pm 0,05)$ г/см³, близкой к плотности аллювия (1,6 г/см³). Песок предварительно высушивали, гранулометрический состав контролировали. В опытах варьировали глубину заложения заряда, регистрировали параметры воронки и навала и снимали профиль выемки в вертикальном разрезе. Радиус R , глубину H и объем V измеряли по уровню первоначальной поверхности. На рис. 1, 2 приведены эти величины в обезразмеренном с помощью $V_{\max}^{1/3}$ виде (обозначаем их черточкой сверху).

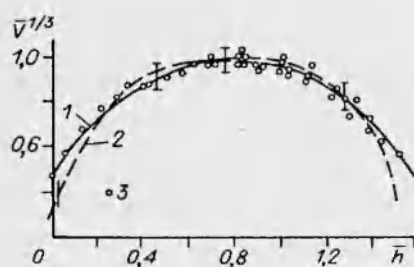


Рис. 1. Зависимость характерного размера воронки $V^{1/3}$ от глубины взрыва (в единицах $V_{\max}^{1/3}$):

1 — модельные взрывы в сухом песке ($E_0 = 0,2$ г ВВ, $\rho_0 \geq 130$ Па); 2 — натурные взрывы; 3 — результаты отдельных модельных опытов.

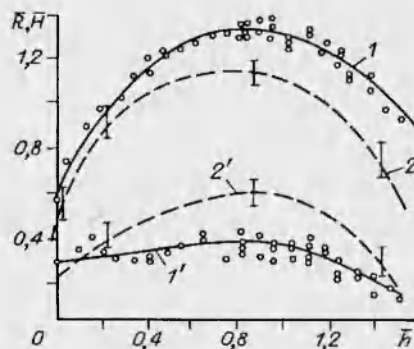


Рис. 2. Зависимость радиуса (1, 2) и глубины (1', 2') воронки от глубины взрыва в единицах $V_{\max}^{1/3}$ (обозначения см. рис. 1).

Аналогичные результаты приведены для натуральных взрывов. Видно, что зависимость $\bar{V}^{1/3}(\bar{h})$ близка к натурной. Вблизи оптимального заглубления R в модели примерно в 1,2 раза больше, а H в 1,5 раза меньше, чем у натуральных взрывов. В основном это отличие связано с меньшей величиной α у насыпного песка, чем у разрушенных крепких и слежавшихся наносных пород.

В поисках более подходящего имитатора среды исследован ряд материалов с повышенным внутренним трением: мраморная крошка, чугунные опилки и почти непористая искусственная среда, сложенная из винипластовых кубиков. Оказалось, что наилучшее моделирование формы воронок дают взрывы в уплотненной прессованием смеси песка с небольшой добавкой вакуумного масла. За счет изменения усилий прессования и количества добавляемого масла можно варьировать физико-механические свойства среды. При необходимости прочность имитатора можно увеличивать внесением клеевых добавок.

Основные опыты проводили в песчано-масляной смеси, содержащей 1,5 или 3 % вакуумного масла. Усилие прессования составляло $\sim 0,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Среда имеет плотность $1,46 \text{ г/см}^3$ и незначительную прочность $\tau = (4 \div 7) \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$. Наличие сцепления позволяет имитировать сложную форму рельефа, в том числе и с крутыми склонами. В разрыхленном состоянии плотность уменьшается до $\rho_1 = 1,1 \text{ г/см}^3$, угол естественного откоса $\varphi = 45^\circ$.

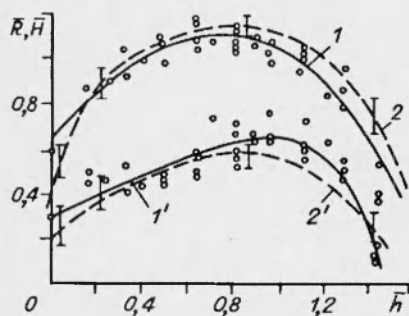


Рис. 3. Зависимость радиуса (1, 2) и глубины (1', 2') воронки от глубины взрыва:

1, 1' — модельные взрывы в песчано-масляной смеси; 2, 2' — натурные взрывы.

В опытах определено влияние заглубления заряда при одиночных взрывах на глубину и радиус воронок (рис. 3). Зависимость $V^{1/3}(h)$ близка к аналогичной для насыпного песка (см. рис. 1). В данном случае как зависимость $\bar{V}^{1/3}(\bar{h})$, так и формы воронок близки к натурным. Однако некоторое отличие формы воронок от натуральных еще остается. В районе оптимального или чуть более глубокого заложения зарядов (наиболее интересная область для ядерных взрывов) величина R для выбранной смеси в среднем на 10 % меньше, чем в натуре. Это означает, что при уменьшении входных параметров изготовления смеси на 1/3 (содержание масла 1–2%, усилие прессования $\sim 0,3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$) совпадение результатов было бы еще лучше.

Работа со смесью более трудоемка, поэтому в ряде случаев целесообразно проводить опыты в сухом песке, а в полученные результаты вносить поправки.

Влияние масштабного фактора

Возрастание параметров \bar{p}_0 и $\bar{\tau}$ при переходе к взрывам меньшего масштаба приведет к неподобию картины выброса. При взрывах одной мощности проверить их влияние можно путем изменения p_0 и τ . К сожалению, изучить влияние τ не так просто, так как трудно варьировать прочность, не меняя эффективного коэффициента кулоновского трения. Например, при переходе от насыпного песка к песчано-масляной смеси изменяется и форма, и объем выемки (V_{max} уменьшается с 3000 до 1900 см^3).

Влияние прочности здесь не ясно. В принципе, разделить эти факторы можно, если проводить опыты с взрывами разной мощности. В данной работе это не делалось. Другая сложность — перенесение результатов на природу. Трудно определить эффективную прочность среды, которая зависит еще от масштаба взрыва, так как даже в однородном по химическому составу массиве верхние слои, как правило, более трещиноваты, чем нижние. Поэтому следует считать большой удачей, что влияние параметра $\bar{\tau}$ на эффект выброса при крупных взрывах для не очень близких к камуфлету случаев невелико.

Что касается величины p_0 , то в естественных условиях давление известно. В лабораторной установке оно просто изменяется и варьируется. Результаты опытов с разным давлением однозначно переносятся на тот случай, когда p_0 постоянно, а меняется масштаб взрыва. Проведено несколько серий опытов, в которых определялись зависимости параметров выемки от глубины при разных значениях p_0 в камере. На рис. 4 показано изменение одной величины — объема воронки. Взрывы проводили в насыпном песке, этим полностью исключалось влияние прочности. Давление варьировалось от 13 Па до атмосферного.

Основные результаты сводятся к следующему.

1. При $13 \leq p_0 \leq 650$ Па форма зависимости $V = f(h)$ сохраняется, величина V_{\max} изменяется в пределах 10 %.

2. При изменении p_0 от 130 до 10^5 Па максимальный объем выемки снижается в 5,5 раза, кривая $V(h)$ сильно деформируется, значение R/h , соответствующее $V = V_{\max}$, увеличивается с 1,5 до 3,5.

Интерпретируя изменение p_0 как изменение мощности взрыва в природных условиях, приходим к следующим выводам. При моделировании крупных взрывов в естественных условиях в непрочной среде и с использованием не очень малых зарядов (например 1 кг ВВ), неподобие явления еще значительно: величина R/h для оптимального выброса отличается в 1,6 раза. Поэтому такое моделирование было бы весьма грубым и, к тому же, гораздо более трудоемким, чем работа с вакуумной камерой. Наоборот, для взрывов от 10 т ВВ и выше должно выполняться хорошее подобие в естественных условиях (при малости или сохранении τ).

Предельная зависимость максимального объема воронки от энергии взрыва

Приведенная выше формула для расчета максимального объема воронки связывает V_{\max} с E_0/ρ_0 для взрывов в естественных условиях. Значения параметров \bar{p}_0 и $\bar{\tau}$ при этом не постоянны, малы, но не равны нулю.

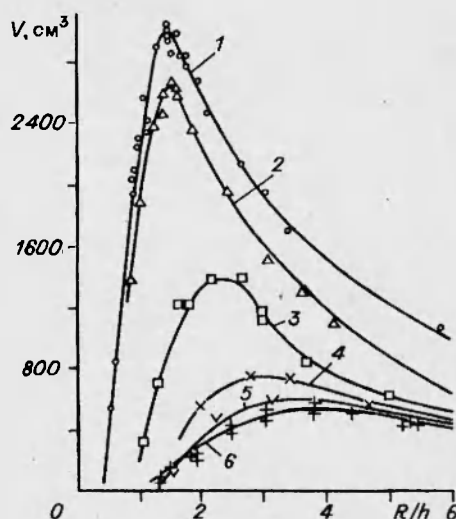


Рис. 4. Зависимость объема воронки от показателя выброса R/h при разных давлениях воздуха в сухом песке ($E_0 = 0,2$ г ВВ).

p_0 , кПа: 1 — 0,05–0,13, 2 — 0,66, 3 — 6,66, 4 — 26,6, 5 — 66,6, 6 — 100; E — энергия натурального взрыва, которой по условию $p_0 = \text{const}$ соответствует давление p_0 в камере, кгт: 1 — $10^2 \cdot 5$, 2 — $13,6 \cdot 10^{-3}$, 3 — $3,4 \cdot 10^{-6}$, 4 — $2,35 \cdot 10^{-8}$, 5 — $8,6 \cdot 10^{-10}$, 6 — $2 \cdot 10^{-10}$.

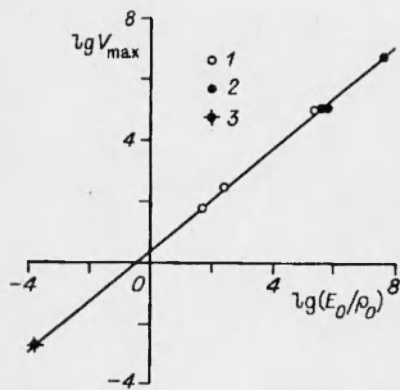


Рис. 5. Зависимость максимального объема воронки от энергии взрыва.

Натурные взрывы в аллювии: 1 — обычные, 2 — ядерные (эффективная энергия снижена в 1,35 раза); 3 — модельные взрывы в песчано-масляной смеси.

($E_0 = 0,2$ г ВВ, $\rho_0 = 1,46$ г/см³, $V_{\max} = 1900$ см³), которая по свойствам близка к аллювию, получим пять точек (одна — тройная). На плоскости ($\lg V_{\max}$, $\lg E_0/\rho_0$) они с хорошей точностью лежат на одной прямой (рис. 5). Таким образом, степенная зависимость между V_{\max} и E_0/ρ_0 выполняется в широком диапазоне изменения мощности взрыва: от 100 кт («Седан») до 0,2 г ВВ (почти 12 порядков). При построении зависимости, как и раньше, ядерные взрывы приводились к обычным эффективным уменьшениям мощности в 1,35 раза. Размерность величин на рис. 5: E_0 — кг ВВ, V_{\max} — м³, ρ_0 — г/см³.

Наклону прямой соответствует $\alpha = 3,68$. Эту величину, а не 3,60 следует сравнивать с теми значениями α , которые получаются при решении модельных задач, изложенных в [1], поскольку там рассматривалось движение непрочного вещества, граничащего с вакуумом.

Анализ экспериментальных результатов

В [1] описаны результаты решения модельных задач о взрывах на выброс в идеализированных средах с упрощенными свойствами. Именно из их решения делается вывод о существовании степенной зависимости $V_{\max}(E_0/\rho_0)$ (для непрочной среды и при отсутствии атмосферы над грунтом). Показатель α в формуле $V_{\max} = C(E_0/\rho_0)^{1/3,6}$ связан соотношением $\alpha = 3(n+4)/(n+3)$ с показателем n в законе затухания механической энергии $E_k \sim r^{-n}$ в стадии симметричного расширения полости. Существуют два автомодельных режима. В одном α и n определяются только показателем адиабаты γ для продуктов взрыва, а в другом — целиком безразмерными параметрами самой среды. В случае простейшей модели грунта, когда он уплотняется в δ раз за ударным фронтом и обладает таким внутренним трением, при котором отношение компонент давления $p_\theta/p_r = a$ ($a < 1$), граничное значение $n = n_0$ вычисляется по приведенной в [1] формуле (3). Если $n < n_0$, закон движения полностью определяется показателем γ (при этом $n = 3(\gamma - 1)$).

Для разумных интервалов изменения

$$1/5 \leq a \leq 1/2, \quad 1,02 \leq \delta \leq 1,2 \quad (2)$$

$2,55 \geq n_0 \geq 1,5, \quad 3,54 \leq \alpha_0 \leq 3,67$. Фактически параметры a и δ , которые

Интересно получить предельную зависимость $V_{\max} = f(E_0/\rho_0)$, которая бы соответствовала нулевым значениям этих параметров.

Привести зависимость к $\bar{p}_0 = 0$ можно путем внесения поправок к V_{\max} , используя опыты с насыпным песком при разных давлениях в камере. Малое же значение \bar{r} обеспечим тем, что за исходные возьмем результаты взрывов в аллювии — самом непрочном из природных грунтов, в которых проводились натурные взрывы. Для получения поправки к V_{\max} удобно, пользуясь рис. 4, предварительно построить зависимость $V_{\max}/3000$ см³ в функции $\lg E$ (E — энергия моделируемого взрыва). Прюделав это и добавив к натурным опытам в аллювии лабораторный при $\bar{p}_0 = 0$ в искусственной смеси

можно было бы сопоставить со свойствами реальных пород, не заполняют весь диапазон значений прямоугольника (2). Как следует из приведенных в [2] данных, для мягкого грунта при значительной влажности $a \approx 0,5$, а у сухого $a < 0,5$. У мягких грунтов пористость значительна (для них $\delta \geq 1,2$ — вполне реальная величина). Значению $\delta \geq 1,2$ при $a = 0,5$ соответствует $n_0 \geq 1,93$. Малая же пористость (до $\delta = 1,02$) — у растрескавшихся скальных пород, которые обладают повышенным коэффициентом трения и способностью к рыхлению. Оба эти фактора снижают величину¹ a , так что $a \leq 1/3$. При $\delta = 1,02$ и $a = 1/3$ $n_0 = 1,96$. Если $n_0 \geq 1,9$, то $\alpha_0 < 3,61$.

Таким образом, полученное из опытов значение $\alpha = 3,68$ заведомо превышает ту величину α_0 , при которой степень затухания энергии начинает зависеть от свойств среды. А это значит, что на всех стадиях движения энергия газа в полости сравнима с кинетической энергией разгоняемого грунта.

Этот вывод подтверждается и экспериментальными результатами. Действительно, полученные из обработки экспериментов наклоны всех четырех прямых на плоскости ($\lg V_{\max}, \lg E_0/\rho_0$) (см. [4]) одинаковы. Прямые проведены на участке, где мощность взрывов менялась на 4–6 порядков. Небольшая разница в наклонах обнаружилась бы в экспериментах с микровзрывами ВВ и это привело бы к существенному отличию V_{\max} в разных средах. В настоящих опытах использовались две среды: насыпной песок и прессованная песчано-масляная смесь, эффективное трение которых существенно отличается, что выражается в большой разнице формы воронок. Тем не менее объемы разнятся в 1,58 раза, а $V_{\max}^{1/3}$ в 1,16 раза. Это лишь немногим больше отношения коэффициентов в формуле (12) в [1] у соседних типов грунта (максимальное отличие коэффициентов C — в 1,35 раза).

Хотя свойства среды и не сказываются на наклоне прямых в плоскости ($\lg V_{\max}, \lg E_0/\rho_0$), но в целом на эффект выброса влияют существенно, особенно в стадии формирования формы воронок.

На основе экспериментального значения $\alpha = 3,68$ можно оценить эффективную величину γ по формуле $\gamma = 1/(\alpha - 3)$. Получается $\gamma = 1,47$. В численных расчетах одномерной стадии движения грунта продукты взрыва ВВ и газообразные компоненты испаренной породы часто приближенно описывают идеальным газом с $\gamma = 1,3 \div 1,5$. Средней из этого интервала величине $\gamma = 1,4$ соответствует $\alpha = 3,71$.

Эффективные значения γ вряд ли одинаковы для ядерных и обычных взрывов, к тому же, они зависят от масштаба явления. Но так как $\alpha = 3 + 1/\gamma$ (т. е. зависимость от γ весьма слабая), то хорошая аппроксимация точек на рис. 5 прямой линией не столь удивительна.

В [4] интерпретируется эмпирическая формула Глосмана [5] для радиуса полости при ядерных камуфлетных взрывах. При этом использовалось значение $n = 2$, рассчитанное по формуле $\alpha = 3(n + 4)/(n + 3)$, исходя из показателя $\alpha = 3,6$. Теперь ясно, что на величине $\alpha = 3,6$ проявилось влияние атмосферного давления, которое в аналитических решениях не учитывалось. Поэтому на самом деле при определении n в законе $E_k \sim r^{-n}$ следует исходить из $\alpha = 3,68$, чему соответствует $n = 1,41$. Отличие от $n = 2$ значительное, и интерпретацию формулы Глосмана следует перепроверить.

Используя приведенные в [1] предельные выражения (9) и (11) для ра-

¹О влиянии рыхления на a и n_0 см. в [3]. Величина n_0 из-за рыхления сдвигается в большую сторону даже при сохранении коэффициента α в уравнении для диссипации энергии $dQ/dt = \alpha[(p_r + p_\theta)/2] \cdot \sqrt{J_2^c/2}$.

диуса камуфлетной полости ($L = R_k$) и проведя степенную интерполяцию $R_k = (\tilde{R}_k')^2 (\tilde{R}_k'')^{-2}$ с $\beta = 0,275$, получим

$$R_k \sim \frac{E_0^{0,333}}{\rho_0^{0,24} h^{0,164} \tau^{0,062}} \quad (3)$$

Это соотношение похоже на формулу Глосмана, которая в [4] приведена к виду:

$$R_k \sim \frac{E_0^{0,306}}{\rho_0^{0,24} h^{0,161} \tau^{0,061}} \quad (4)$$

При выводе (3) принято $A \sim \rho_0^{-1/3}$. Эта зависимость используется при вычислении параметра, от которого откладывается величина V_{\max} в логарифмическом масштабе. Теперь этот параметр — $E_0/\rho_0^{0,91}$ (для $\alpha = 3,68$). Показатель 0,91 (раньше было 0,90) округляем до 1,0.

Заметное различие в n слабо сказалось на сумме показателей при h и τ , поскольку n входит в виде $1/(n+3)$. При $n = 2$ сумма показателей 0,2, а при $n = 1,41$ она стала 0,227, что совсем близко к эмпирической величине 0,222.

Как и в [4], не следует придавать большого значения хорошему соответствию показателей. Главное, что результаты по камуфлетным взрывам не противоречат представлениям о законах подобия, полученным на основе приближенной теории и экспериментов с выбросом грунта. Небольшое расхождение в показателях степени при E_0 можно отнести, во-первых, на зависимость свойств грунта от глубины при неизбежной корреляции между глубиной скважины и мощностью взрывов и, во-вторых, на неподobie в условиях заложения зарядов большой и малой мощности.

Заключение

Описанная методика приближенного моделирования крупных взрывов на выброс в условиях неизменной силы тяжести возникла на несколько лет позднее, чем известный способ ИФЗ РАН, которому посвящены многочисленные публикации. Эти методики не совпадают. В настоящей — другой источник энергии и другая теоретическая основа. В методике ИФЗ источником энергии служит пузырь с газом. Поскольку методика, к сожалению, не опирается на обоснованную теорию подобия, при выборе параметров газового пузыря авторам приходится применять некоторые искусственные приемы. Размеры и давление газа в пузыре связываются с параметрами камуфлетной полости (при глубоком взрыве) и определяются из решения задачи, где приходится учитывать прочность грунта. Движение начинается с расширения полости, которая вначале неподвижна. На самом деле она неподвижна только в начальный момент, когда плотность газов равна плотности ВВ. Значительные размеры пузыря не позволяют моделировать мелкозаглубленные взрывы или взрывы с близко расположенными зарядами. Несмотря на имеющиеся недостатки методика ИФЗ нашла большое применение при решении разных практических задач со взрывами на выброс.

Методика ВНИИТФ, к сожалению, использовалась меньше. Но возможность сравнить результаты теоретических исследований с экспериментальными позволила глубже понять физику подземного взрыва. Основное же предназначение методики — приближенное моделирование выброса в условиях сложного рельефа местности при одиночных и групповых взрывах ядерных и обычных зарядов. В свое время с помощью созданной

установки изучено траншееобразование при групповых взрывах с линейно расположенными зарядами и при одиночных взрывах на склонах, а также исследован механизм образования центрального холмика в воронках при взрывах с глубоким заложением заряда. Эти результаты, как и изложенные в данной работе, ранее не публиковались. Их предполагается представить позднее. С помощью данной методики можно решать и другие, не менее интересные задачи.

Авторы благодарят О. Г. Крусина, В. И. Куприянчука и В. П. Гомикова за участие в создании установки и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрамеев Ю. С. Физические основы приближенного моделирования взрывов на выброс // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 123–130.
2. Алексеенко В. Д., Григорян С. С., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Некоторые экспериментальные исследования по динамике мягких грунтов // Докл. АН СССР. 1960. Т. 133, № 6. С. 1311–1314.
3. Вахрамеев Ю. С., Демьяновский С. В. Расширение газовой полости в рыхлящейся среде с сухим трением // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1974. № 1. С. 38–42.
4. Вахрамеев Ю. С., Михальков Н. Г. О подобии взрывов в грунте и возможностях приближенного моделирования выброса // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теор. и прикл. физика: Науч.-техн. сб. 1988. Вып. 1. С. 63–72.
5. Glosmann P. J. On the prediction of cavity radius produced by an underground nuclear explosion // J. Geophys. Res. 1969. V. 74, N 15. P. 3935–3939.

Поступила в редакцию 1/IV 1994 г.
