6. Нестеренко В.Ф., Лазариди А.Н., Сибиряков Е.Б. Распад солитона на контакте двух «звуковых вакуумов» //ПМТФ. — 1995 (в печати).
7. Leroy Y.N., Molinary A. Space particles with size effects in shear zones: a hyperelastic model with high-order gradients //J. Mech. Phys. Solids., 1993. — 41. — P. 631.
8. Кунин И.А. Теория упругих сред с микроструктурой. — М.: Наука, 1975. — 202 с.
9. Albert J.P., Bona J.L. Comperisons between Model equation for leng waves //J.Nonlinear Sci., 1991. — 1. — P. 345.
10. Kruskal M. Nonlinear wave equations //Lecture Notes in Physics, 38 (Dynamical Systems, Theory and Applications), Springer-Verlag., Heidelberg, 1975. — P. 310—354.

630099, г. Новосибирск, ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 14/VIII 1994

УДК 622.235.5

Ю.С. Вахрамеев

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБЛИЖЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗРЫВОВ НА ВЫБРОС

Рассмотрены разные случаи точного и приближенного подобия подземных взрывов с выбросом грунта. Обращено внимание на противоречие между имевшимся представлением о законе подобия и данными обработки результатов крупномасштабных экспериментов. Дана уточненная теория явления. Показана возможность приближенного подобия выброса в одинаковой среде. Установлено согласие изложенных представлений с результатами более тщательной обработки опытов. Предложен набор удобных безразмерных параметров, являющихся основой методики приближенного моделирования крупномасштабных взрывов в лабораторных условиях.

Геометрическое подобие и моделирование выброса на его основе

В механике сплошных сред есть много случаев, когда справедлив геометрический закон подобия. Геометрическое подобие широко используется во взрывных процессах для моделирования их на той стадии, когда характерные ускорения намного превышают ускорения силы тяжести.

При подземных взрывах с выбросом грунта размеры навала зависят от траектории полета кусков породы, которая определяется ускорением силы тяжести g и характерной скоростью кусков v_0. Сочетание их дает величину с размерностью длины v_0^2/g, не связанную с размерами тела. Если при моделировании процесса искусственно изменять g по закону $g^{м} = g(E_0^{н}/E_0^{м})^{1/3}$ (здесь E_0 — энергия или масса ВВ), то высота подъема кусков $\sim E_0^{1/3}$, и геометрический закон подобия останется в силе.

Попытки моделирования взрывов на выброс таким образом не дали ощутимых результатов. При идейной простоте моделирование связано с большими техническими трудностями по созданию искусственной тяжести и по измерению эффекта, которое нужно провести за время действия повышенного ускорения. Не меньшие трудности сопряжены и с необходимостью точного воспроизведения свойств реального массива на малых образцах грунта, без чего все моделирование останется только приближенным.

Ниже рассматриваются вопросы приближенного моделирования выброса малыми взрывами без искусственного изменения силы тяжести.

Противоречие между экспериментом и простейшими представлениями о подобии крупных взрывов на выброс

Реально многие свойства грунта на эффекте выброса не сказываются. Крупнейшие специалисты по физике взрывов, в том числе подземных, академики М.А. Лаврентьев и М.А. Садовский считали, что при взрывах на выброс большого масштаба прочность горных пород несущественна. М.А. Лаврентьев многие задачи со взрывом решал в предположении, что грунт — несжимаемая жидкость. В предложенной М.А. Садовским с сотрудниками методике моделирования выброса грунт имитировался насыпным песком.

При таком подходе закон подобия обычно получают из простого анализа размерности определяющих параметров задачи. Ими являются: плотность грунта ρ_0, энергия взрыва E_0, ускорение силы тяжести g и один из геометрических размеров, например, глубина заложения заряда h. Тогда из анализа соображений размерности вытекает $E_0 \sim \rho_0 g h^4$, и условие подобия для крупных взрывов на выброс имеет вид

$$h \sim (E_0/\rho_0)^{1/4}. \quad (1)$$

Для песка или разрушенной горной породы важным параметром является также коэффициент кулоновского трения между кусками, от которого зависит угол естественного откоса. Этот параметр безразмерный, соотношение (1) применительно к определенной породе остается в силе. В методике ИФЗ соотношение (1) используется при построении основных параметров моделирования.

Итак, для крупных взрывов на выброс существовали: 1) утверждение, что прочность горных пород несущественна; 2) соотношение подобия для непрочных сред $h \sim E_0^{1/4}$; 3) экспериментальная зависимость $h \sim E_0^{1/3,4}$. Последняя получена в США обработкой результатов опытов крупных взрывов на выброс.

Налицо противоречие, и большое. Действительно, для взрывов в прочных средах, таких, когда весь отколовшийся грунт из кратера выбрасывается, сила тяжести на размерах выемки не сказывается. Форма кратеров подобна, если $h \sim E_0^{1/3}$. Из сравнения показателя 1/3,4 с 1/3 и 1/4 следовало бы сделать вывод, что в реальных условиях при крупных взрывах прочность породы еще весьма существенна.

Наличие противоречия требует критически отнестись к положению 1 и к результатам 2 и 3. Проще было бы подвергнуть сомнению 1, заменив его выводом о важной роли прочности. Мы же начнем с критического анализа результатов 2 и 3.

Законы подобия при взрыве в средах с упрощенными свойствами

При выводе (1) неявно предполагается, что при разных масштабах взрыва на поднятие грунта идет одна и та же доля полной энергии. Если бы действовал геометрический закон подобия, например, при моделировании с увеличенным ускорением силы тяжести, то это предположение выполнялось бы автоматически. Действительно соотношение (1) не отвечает геометрическому подобию. Здесь полезная доля энергии сама может зависеть от масштаба взрыва.

Для анализа проблемы обратимся к решению упрощенных задач о подземном взрыве с выбросом. Как и при выводе (1), пренебрежем влиянием атмосферы и прочности грунта, но учтем процессы диссипации механической энергии, которые при реальных взрывах играют значительную роль.

В задаче [4] среда состоит из слабо сцепленных мелких кусков, обладающих «сухим» трением. Первоначально пористое, вещество разрушается и уплотняется в δ раз под действием ударной волны (УВ) любой интенсивности, и это уплотнение сохраняется во всей области за фронтом УВ. В другом случае [5] дополнительно к перечисленным свойствам вещество обладает еще способностью к рыхлению, скорость которого пропорциональна интенсивности сдвига и величине $(1 - \rho/\rho_1)$, что обеспечивает постепенное приближение плотности к насыпной ρ_1. Продукты взрыва ВВ заменялись идеальным газом с постоянным значением показателя адиабаты γ. Излагаемые ниже результаты относятся к взрыву ВВ сферической или достаточно компактной формы.

В данной постановке в обеих задачах среда и ВВ характеризуются только двумя размерными параметрами, один из которых — начальная плотность вещества ρ_0, а другой — зависящий от энтропии газа множитель S в соотношении $p = S \cdot R^{-3\gamma}$ между давлением p и радиусом внутренней границы грунта R. Начальный размер полости считается малым, силами земного притяжения до стадии свободного полета грунта пренебрегается. В результате перед выходом УВ на наружную поверхность движение оказывается автомодельным.

В первом случае (когда рыхление не учитывается) решение для симметричного движения находится аналитически в виде конечных соотношений, во втором — легко получается численным интегрированием при конкретных значениях входящих в задачу коэффициентов. Общее в обоих решениях — степенная зависимость между кинетической энергией $E_к$ приведенного в движение вещества и радиусом котловой полости:

$$E_к = BR^{-n}. \qquad (2)$$

В такой постановке механическая энергия тратится на преодоление внутреннего трения и на разогрев вещества на фронте УВ. Величина показателя n зависит от соотношения безразмерных параметров. Если давление в полости спадает медленно (γ невелико), то $n = 3(\gamma - 1)$. В противном случае автомодельная стадия движения наступает после практически полной передачи энергии продуктов взрыва (ПВ) грунту, когда вещество движется при $p \simeq 0$ на его внутренней границе. Для этого режима обозначим $n = n_0$. Показатель n_0 не зависит от γ, а определяется параметрами, характеризующими свойства среды. При отсутствии рыхления

$$n_0 - \frac{3(1 - a)}{(1 + a)} + \frac{2a(2a - 1)}{(1 + a)\delta}\left[\left(\frac{\delta}{\delta - 1}\right)^{\frac{2a-1}{3}} - 1\right]^{-1}, \; a \neq 0{,}5, \qquad (3)$$

$$n_0 = 1 + 2/\ln[\delta/(\delta - 1)], \;\; a = 0{,}5,$$

где $a = p_\varphi / p_r$ — коэффициент сухого трения (p_φ и p_r — угловая и нормальная компоненты давления). Для движения от центра $a < 1$.

При любых $1 \leqslant \delta \leqslant \infty$, $0 \leqslant a \leqslant 1$ значения n лежат в пределах $0 \leqslant n \leqslant 3$. Режим с конечным давлением в полости, когда $n = 3(\gamma - 1)$, осуществляется только при $3(\gamma - 1) < n_0$. Заметим, что решение (3) более точное, чем приведенное в [3, 4], где случай $a = 0{,}5$ упущен.

Свяжем величину $E_к$ с начальной энергией взрыва E_0. На очень ранней стадии движения, когда давление в полости достаточно велико (а ее размеры сравнимы с начальными размерами ВВ), грунт и ПВ описываются более сложными уравнениями состояния. Но считается, что при меньших нагрузках они удовлетворяют принятой модели. В силу закона геометрического подобия и в начале движения, и на автомодельной стадии

$$E_к = E_0 F(E_0^{1/3}/GR), \qquad (4)$$

где G — некий размерный параметр, зависящий от всех свойств среды и ВВ. В стадии автомодельного движения справедливо (2), и на этом этапе

$$F(E_0^{1/3}/GR) \sim E_0^{n/3} G^{-n} R^{-n}. \qquad (5)$$

Отсюда

$$B = A \cdot E_0^{1+n/3}. \qquad (6)$$

Здесь A — новый размерный параметр, включающий G. Для взрывов разного масштаба, но с одним ВВ и в одинаковой среде A = const (у ядерных взрывов свои значения А). Здесь роль ПВ играют пары грунта, испарившегося за фронтом УВ (начальный объем их при крупных взрывах и плотном заряжании пропорционален E_0, как и для обычных ВВ).

Пусть среда граничит с пустотой, поверхность раздела задана функцией $r/h = f_1(\theta,\varphi)$, где r — расстояние точек поверхности от центра взрыва в направлении под углами θ и φ. При плоской поверхности раздела h — глубина взрыва, а при произвольной может быть и другой масштабный размер. После выхода УВ на границу с пустотой начнется выброс вещества с последующими падением и образованием нового профиля. Для определенности упавшее вещество считаем уплотненным.

В задачу с выбросом входят четыре определяющих параметра: ρ_0, h, g и характерная энергия $E^* = Bh^{-n}$ на момент окончания стадии симметричного движения. Из них можно составить одну безразмерную комбинацию

$$l_1 = E^*/\rho_0 g h^4 \approx (A/\rho_0 g)\,(E_0/h^\alpha)^{1+n/3},\quad \alpha = 3\frac{n+4}{n+3}. \qquad (7)$$

Конечный профиль поверхности, если его представить в виде $r/h = f_2(\Theta,\varphi)$, должен зависеть только от безразмерных параметров задачи и безразмерной функции $f_1(\theta, \varphi)$. При l_1 = const, т.е. когда $E_0 \sim h^\alpha$, и при подобных начальных профилях поверхности форма воронок после взрыва окажется одинаковой. Так как показатели n или n_0 лежат в пределах от 0 до 3, то $3{,}5 \leqslant \alpha \leqslant 4{,}0$.

В [3] рассмотрена также задача в более общей постановке. Уравнение состояния грунта характеризуется сложной зависимостью между компонентами тензоров напряжений и деформаций. Но эта зависимость такова, что с помощью безразмерных коэффициентов все размерные параметры сводятся к двум величинам: к плотности ρ_0 (как в уже рассмотренных задачах) и к характерной прочности τ. Над поверхностью грунта имеется воздух при давлении p_0.

На стадии одномерного движения давления в грунте велики, прочность существенной роли не играет, нет нужды учитывать и давление воздуха. Поэтому движение в этой стадии тоже автомодельно. Соотношения (2), (4) — (6) остаются в силе, только показатель n неизвестен. Однако ограничения $0 \leqslant n \leqslant 3$ и неравенство $3{,}5 \leqslant \alpha \leqslant 4{,}0$ сохраняются, поскольку числа 0 и 3 для n не зависят от конкретного вида уравнения состояния: $n = 0$ при отсутствии диссипативных процессов, а $n = 3$ отвечает максимально возможной скорости диссипации. Ограничение n сверху связано с условием сохранения импульса в узких секторах (при $n = 3$ $a = p_r/p_* = 0$, взаимодействия секторов нет).

Поскольку в общей постановке задачи, описывающей последнюю стадию движения грунта, к определяющим параметрам добавляются τ и p_0, то всего получается шесть размерных величин: ρ_0, g, h, τ, p_0 и $E^* = Bh^{-n}$. Из них можно составить три независимые безразмерные комбинации. Выберем

$$l_1 = \frac{Bh^{-n}}{\rho_0 g h^4};\quad l_2 = \frac{p_0}{\rho_0 g h};\quad l_3 = \frac{\tau}{\rho_0 g h}. \qquad (8)$$

Для подобия картины выброса должны сохраняться значения всех трех параметров.

В естественных условиях для взрывов разного масштаба этого сделать нельзя. Однако могут быть случаи приближенного подобия, когда один из трех параметров более существен, чем два других.

При взрывах малого масштаба в относительно прочных средах с $\tau \gg p_0$ третий параметр больше второго. Если заглубление относительно невелико, и весь отколовшийся грунт выбрасывается далеко за пределы кратера, то сила тяжести роли не играет. Для воронки с характерным размером L имеет место зависимость

$$L \sim A^{1/(n+3)} E_0^{1/3} \tau^{-1/(n+3)}. \tag{9}$$

Она следует из $L \sim h$ при $l_1/l_3 = \text{const}$ (в l_1/l_3 не содержится g). Соотношение (9) выполняется только в случае подобия начальных профилей поверхности и сохранения свойств среды.

Для взрывов достаточно большого масштаба, когда $l_2 \ll 1$ и $l_3 \ll 1$, условием подобия выброса является $l_1 = \text{const}$, и мы приходим к (7). Из (7) следует, что размеры воронки и глубина взрыва связаны с E_0 зависимостью

$$L \sim h \sim (A/\rho_0)^{1/(n+4)} E_0^{1/\alpha}. \tag{10}$$

В отличие от предыдущего случая здесь подобны и формы воронок и профили навала.

Результаты (9) и (10) распространяются также на камуфлетные взрывы. Тогда L — конечный размер полости. Если в случае $h \gg \tau/\rho_0 g$ подобие в глубине заряда не соблюдается, то размер полости

$$L \sim (A/\rho_0)^{1/(n+3)} E_0^{1/3} h^{-1/(n+3)}. \tag{11}$$

Сравнением кинетической энергии из (6) и (2) получается $E_к = BL^{-n} = AE_0^{1+n/3}L^{-n}$ с литостатической $E_л \sim \rho_0 g h L^3$. При $h = (A/\rho_0)^{1/(n+4)} E_0^{1/2}$ (11) переходит в (10).

Итак, с учетом процессов диссипации энергии в грунте (а они всегда присутствуют) соотношение подобия $h \sim E_0^{1/4}$ является лишь далеким предельным случаем. Фактически даже для очень крупных взрывов показатель степени при E_0 лежит между 1/4 и 1/3,5. Это ближе к 1/3,4, однако полностью противоречие еще не устранено. Необходимо проверить правильность показателя 1/3,4.

Результаты обработки экспериментов со взрывами на выброс

Реальные горные породы обладают более разнообразными свойствами, чем это учитывалось в упрощенных моделях. Но если главные особенности в моделях все же отражены, то можно надеяться на существование подобия крупных взрывов и в реальных средах.

При повторной обработке экспериментов была надежда получить уточненные результаты, во-первых, за счет дифференцированного отношения к взрывам в разных породах (раньше они не разделялись) и, во-вторых, путем построения зависимостей от E_0 и h не линейных размеров выемки (радиуса и глубины), как это делалось раньше, а объема, который является интегральной, а значит и более устойчивой характеристикой. Под объемом понимается объем воронки до уровня первоначальной поверхности.

При взрывах на выброс существует оптимальная глубина заложения зарядов, при которой объем выемки максимален $V = V_{max}$. Эта величина сравнивалась с энергией взрыва, отнесенной к плотности породы. При откладывании точек на плоскости ($\lg V_{max}$, $\lg(E_0/\rho_0)$) одновременно строилась зависимость $(V/V_{max})^{1/3} = f(h/V_{max}^{1/3})$. С ее помощью находилось значение V_{max} тогда, когда относительное заглубление заметно отличалось от оптимального (при этом следили за тем, чтобы точки на данном участке кривой подкреплялись другими опытами). Были обработаны все известные нам одиночные взрывы с обычными и ядерными зарядами под горизонтальной поверхностью, проведенные в СССР и США. Сводка данных по всем взрывам приведена в [3]. При $E_0 > 10$ т ВВ при построении кривых учитывались все опыты. При взрывах меньшей мощности (обычно они проводились сериями) на плоскости ($\lg V_{max}$, $\lg(E_0/\rho_0)$)

откладывались данные для того взрыва, у которого величина V максимальна. Результаты опытов усреднялись.

Оказалось, что на плоскости $(\lg V_{max}, \lg(E_0/\rho_0))$ точки хорошо группируются вокруг четырех параллельных прямых

$$V_{max}^{1/3} = C(E_0/\rho_0)^{1/3,6}. \qquad (12)$$

Каждой линии соответствуют взрывы в грунте с близкими свойствами. Точки для ядерных зарядов располагаются на тех же прямых, что и для ВВ, если их энергия уменьшается в 1,35 раза.

Значения C для каждой группы грунтов таковы: 1,61 — глины, глинистые сланцы; 1,44 — песчаники, аргиллиты и алевролиты с прослойками песчаника; 1,28 — алмовиальные почвы, пески, алевролиты; 1,19 — базальт, сухой риолит.

Для случая, когда опыт проводился в сильно влажном туфе («Скунер»), $C = 1,31 \pm 0,06$, что близко к взрывам в аллювии. Данные коэффициенты получаются, если объем выражен в м^3, плотность в г/см^3, E_0 в кг ВВ. Приведенные здесь значения C подправлены автором после выхода работы [3], в них учтена дополнительная информация для ряда опытов (в [3] значения были соответственно 1,59; 1,43; 1,29; 1,15). Эти уточнения незначительны и практически не повлияли на положение прямых в плоскости $(\lg V_{max}, \lg(E_0/\rho_0))$ и форму кривой $(V/V_{max})^{1/3} = f(h/V_{max}^{1/3})$. Поэтому в данной статье рисунки не приводятся.

Из расположения точек на плоскости $(V/V_{max}, h/V_{max}^{1/3})$ видно, что когда заглубление заряда мелкое, оптимальное или немногим больше оптимального, точки хорошо группируются вокруг одной линии, которая существенно отличается от аналогичной зависимости для малых взрывов. Отсюда следует, что прочность грунта при крупных взрывах практически несущественна. Для глубоких заложений такого вывода сделать нельзя, так как правее максимума разброс точек больше, и есть один случай, когда точка оказалась на нижней полуплоскости (опыт «Салки» в базальте, $E_0 = 0,9$ кг, вместо выемки — большой холм). Значит, при приближении к камуфлету прочность становится более существенной. Когда масштаб взрыва мал, а грунт прочный, точки располагаются хаотично даже для заряда одной массы в одном и том же грунте. (В [3] это продемонстрировано опытами с $E_0 = 0,45$ т в базальте). Это означает либо сильную неоднородность породы по прочности, либо то, что процесс трещинообразования происходит случайным образом.

Итак, показано, что прочность для крупных не сильно перезаглубленных взрывов действительно играет слабую роль и что из экспериментов следует существование приближенного подобия явления, когда $h \sim E_0^{1/3,6}$. Показатель степени теперь лежит в пределах возможных значений, получающихся из теоретических представлений. Заметим также, что для определения показателя при E_0 использовались результаты взрывов разной мощности (E_0 — 5 ÷ 6 порядков). Роль атмосферного давления с уменьшением мощности возрастает. Поэтому если бы атмосферное давление отсутствовало (а приведенный диапазон теоретических значений α получался в этих предположениях), то показатель степени при E_0 был бы меньше. Забегая вперед, скажем, что из результатов модельных экспериментов в вакуумной камере, которые будут изложены в следующей статье, следует, что фактический показатель n в зависимости $E_к \sim R^{-n}$ лежит почти точно в середине допустимого диапазона $0 \leq n \leq 3$. Таким образом, отмеченные ранее противоречия полностью отпали.

Обращаем внимание также на следующее обстоятельство. Из параллельности прямых на плоскости $(\lg V_{max}, \lg(E_0/\rho_0))$ для грунтов, сильно отличающихся по коэффициенту внутреннего трения (например, глины и крепкие горные породы), следует, что показатель степени при E_0 для реальных взрывов определяется не свойствами среды, а эффективным значением показателя γ для продуктов взрыва. При обсуждении модельных экспериментов в следующей статье на этот счет будут приведены дополнительные доводы. От свойств же среды зависит профиль давления в движущемся грунте, размеры и профиль воронок и т.д. Оказывается, что наиболее глубокие выемки получаются в базальте, средние — в слабых наносных породах, самые мелкие — у глин и песчаников (последовательность такая же, как у коэффициентов C в (12)).

Полученные соотношения (9) и (11) позволяют описать результаты не только взрывов с выбросом, но и камуфлетных. Как показано в [3], на этом пути удается интерпретировать эмпирическую формулу Глосмана [6], которая построена по результатам примерно 45 опытов с ядерными взрывами в разных средах.

О моделировании взрывов на выброс в лабораторных условиях

При решении задачи в упрощенной постановке получен набор из трех безразмерных параметров l_1, l_2, l_3 (8). В случае сохранения каждого из них картина выброса остается подобной, если взрывы производятся в одной и той же идеализированной среде, обладающей определенными свойствами.

Аналогичным образом попытаемся сформулировать условия подобия взрывов на выброс в разных реальных средах. Конечно, в этом случае можно рассчитывать только на приближенное подобие как всей картины выброса, так и конечного профиля поверхности.

Важной характеристикой грунта, от которой зависит процесс диссипации энергии, угол естественного откоса, а следовательно, и форма насыпи, является коэффициент внутреннего ("сухого") трения $\varkappa$. Для имитации крупных взрывов необходимо проводить взрывы в среде с близким значением коэффициента кулоновского трения между отдельными кусками породы или ее имитатора или с близким углом естественного откоса.

В безразмерных комбинациях в качестве параметра длины взята величина h, а характерной энергией взрыва — комбинация $Bh^{-n} = AE_0^{(1+n/3)}h^{-n}$. Величина A зависит от условий закладки ВВ или ядерного заряда, свойств ПВ или испаренного грунта и свойств конденсированного грунта при высоких давлениях. Сравнивать величины A для разных грунтов и зарядов очень сложно. Поэтому выберем в качестве основного параметра величину V_{max} (максимальный объем выемки при взрыве под горизонтальной поверхностью), а в качестве линейного масштаба взрыва — $V_{max}^{1/3}$. Величина V_{max} удобна тем, что она включает и энергию взрыва, и все то, от чего зависит параметр A. При моделировании крупных взрывов V_{max} может быть вычислена по формуле (12), а для лабораторного опыта (после выбора заряда и имитатора среды) — определена экспериментально в результате небольшой серии взрывов.

Итак, для моделирования выброса требуется сохранение каждого из четырех безразмерных параметров

$$h/V_{max}^{1/3};\quad p_0/\rho_0 g V_{max}^{1/3},\quad \tau/\rho_0 g V_{max}^{1/3};\quad \varkappa.$$

При крупных взрывах величина второго и третьего параметров мала из-за большого знаменателя. В лабораторных условиях это можно достигнуть за счет соответственного уменьшения числителя, проводя опыты в атмосфере с пониженным давлением, а в качестве имитатора грунта, используя заранее разрушенное вещество. Оба этих фактора включает и методика ИФЗ.

Можно считать символичным, что в наборе определяющих параметров отсутствует начальная энергия взрыва E_0. При диссипации часть механической энергии превращается в тепловую, а при слабых сжатиях твердых тел $p_т/E_т \ll p_у/E_у$, так как $p_т \sim E_т$, а $p_у \sim \sqrt{E_у}$. Поэтому тепловая часть энергии фактически выбывает из игры и в задачах не учитывается. Для учитываемой же в уравнениях движения механической энергии закон сохранения не выполняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М.А., Адушкин В.В., Родионов В.Н. Моделирование крупных взрывов на выброс // Докл. АН СССР. — 1966. — 167, 6. — С. 1253—1255.
2. Садовский М.А., Адушкин В.В., Родионов В.Н.. Старцев Г.Н. Об одном способе моделирования крупных взрывов на выброс // ФГВ. — 1967. — 3, № 1. — С. 119—127.
3. Вахрамеев Ю.С., Михальков Н.Г. О подобии взрывов в грунте и возможностях приближенного моделирования выброса // Науч.-исслед. сб. "Вопросы атомной науки и техники", серия: Теоретическая и прикладная физика. — 1988. — Вып. 1. — С. 63—72.
4. Вахрамеев Ю.С. Некоторые соотношения подобия для движения сыпучей уплотняющейся среды // ПММ. — 1970. — 34, № 5. — С. 930—934.
5. Вахрамеев Ю.С., Демьяновский С.В. Расширение газовой полости в рыхлящейся среде с сухим трением // ФТПРПИ. — 1974. — № 1.—С. 38—42.
6. Glosmann P.J. On the prediction of cavity radius produced by an underground nuclear explosion // J. Geophysical Research. — 1969. — 74, N 15. — P. 3935—3939.

454070, г. Челябинск,
ВНИИТФ

Поступила в редакцию
14/III 1994

УДК 621.7.044.2:621.762.4:666.33.7

О.Г. Епанчинцев, В.Ф. Нестеренко, Е.Д. Табачникова

СВОЙСТВА МАССИВНЫХ КОНТАКТОВ Ag/YBCO, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО КОМПАКТИРОВАНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКОЙ

Методом взрывного компактирования по осесимметричной схеме при давлении ударной волны 2 ГПа получены низкоомные массивные контактные соединения Ag/YBCO ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$). Измерены прочность на сжатие при 300 K, микротвердость и электросопротивление при температурах в интервале 300—77 K отожженных образцов Ag/YBCO. Предел прочности на сжатие составил 0,12 ГПа, микротвердость керамики YBCO вблизи поверхности раздела Ag/YBCO составила 3,1 ГПа, удельное контактное сопротивление при температуре жидкого азота $<1 \cdot 10^{-8}$ Ом · см^2 (площадь контакта ~ 1,0 см^2).

При проведении фундаментальных и прикладных исследований высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов сохраняет актуальность задача получения омических контактов с низким удельным переходным (контактным) сопротивлением ρ_k, особенно низкоомных контактов с массивным керамическим ВТСП-образцом [1—4]. Контакты должны обладать не только низким электрическим сопротивлением, но и высокой механической прочностью связи с поверхностью ВТСП-керамики.

Созданию омических контактов с низким удельным контактным сопротивлением, препятствует находящийся на поверхности ВТСП-материалов деградированный плохопроводящий слой [4, 5]. Он возникает из-за нарушения стехиометрии ВТСП-материала как при синтезе, так и за счет деградации поверхности под действием окружающей атмосферы. Кроме того, при осаждении металла контакта на образец возможно их химическое взаимодействие с образованием окисных непроводящих слоев. Сравнительный анализ стандартных свободных энергий образования окислов различных металлов показывает, что только для окислов Ag, Au, Hg, Ir, Os, Pd, Pt, Rh, Ru эта энергия меньше, чем для CuO [6]. Все остальные металлы вступают с оксидными сверхпроводниками в химические реакции, сопровождающиеся разрушением сверхпроводящих свойств приповерхностных слоев ВТСП-материала и окислением контактирующего с ним металла. Поэтому используемые в настоящее время методы изготовления низкоомных металлических