

**МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ И ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ
ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ВЗРЫВЕ**

В. М. Кузнецов, Е. Н. Шер

(Новосибирск)

Теоретические основы направленного взрыва изложены в работе [1]. Результаты экспериментов, проведенных в мягком грунте [2], показали принципиальную правильность предложенной схемы и позволили уточнить закон расположения взрывчатого вещества (ВВ) на поверхности выбрасываемой массы грунта. Ниже излагаются результаты дальнейших исследований и экспериментов в этом направлении¹.

Опыты показали, что вопрос о подобии при направленном взрыве теснейшим образом связан с вопросом о величине забивки. В общем случае показатель моделирования в зависимости от степени забивки может изменяться в пределах от 3.5 до 7.

Далее, при направленном взрыве в скальном грунте необходимо принимать во внимание прочностные свойства среды, учет которых вносит существенные поправки в схему идеальной несжимаемой жидкости. Направление выброса зависит от последовательности инициирования зарядов ВВ. Замедленное взрывание в ряде случаев может привести к существенному уменьшению расхода ВВ.

1. Масштабный эффект. Пусть выбрасываемая масса грунта ограничена произвольной поверхностью с характерным линейным размером l . Пусть, далее, этот линейный размер увеличен в k раз с сохранением геометрического подобия областей. Тогда при увеличении суммарного импульса I , сообщаемого ВВ, в k^3 раз скорость выбрасываемой массы грунта не изменится. Поскольку дальность полета грунта пропорциональна v^2 , то для получения геометрически подобного выброса скорость v должна быть увеличена в $k^{1/2}$ раз. Таким образом, для получения геометрически подобных воронок и развалов грунта при увеличении масштаба опыта в k раз импульс, сообщаемый ВВ грунту, при направленном взрыве должен быть увеличен в $k^{3.5}$ раз. Этот вывод следует, конечно, и из общих соображений теории размерностей, поскольку определяющими параметрами в данном случае являются: импульс J , линейный размер l , плотность среды ρ и ускорение силы тяжести g . Из этих параметров составляется только одна безразмерная комбинация, представляющая собой формулу моделирования при направленном взрыве

$$\frac{J}{\rho g^{0.5} l^{3.5}} = \text{const} \quad (1.1)$$

Как следует из работы [2], зависимость удельного импульса от веса ВВ на единицу площади в различных условиях работы заряда может быть различной. Если метаемый объем грунта находится на воздухе или окружен сильно сжимаемой средой, то импульс пропорционален энергии (весу) ВВ. В этом случае формула моделирования направленного взрыва совпадает с известной формулой для больших взрывов на выброс [3]. Если же грунт выбрасывается из массива, то, предполагая, что масса грунта, вовлеченная в движение за время действия нагрузки, во много раз превосходит массу продуктов детонации, получаем

$$J = \sqrt{2mE} \quad (1.2)$$

где E — энергия ВВ, m — масса грунта, вовлеченная в движение.

¹ Исследования проведены летом 1962 г. в Институте гидродинамики СО АН СССР совместно с трестом «Союзвзрывпром» в скальном грунте.

Если в этом выражении m — вся выбрасываемая масса грунта, то $m \sim l^3$ и из (1.1) и (1.2) получаем другую известную формулу для мощных взрывов на выброс [4]

$$\frac{E}{\rho g l^4} = \text{const} \quad (1.3)$$

которая также следует из общих соображений теории размерностей в том случае, когда определяющим параметром вместо импульса является энергия.

Однако практически величина m в выражении (1.2) не равна всей выбрасываемой массе грунта, а определяется временем действия нагрузки, т. е. зависит от забивки скважин. Случай $m \sim l^3$ является в этом смысле предельным и имеет место тогда, когда истечение газов — продуктов детонации через устье скважин отсутствует.

Однако на практике оно всегда имеется и может играть существенную роль, особенно при взрывах в скальном грунте. Если, например, забивка остается постоянной при увеличении масштаба, как это наблюдалось в описанных ниже опытах, то естественно предположить, что масса m , вовлеченная в движение, пропорциональна толщине слоя ВВ, или, приближенно, $m \sim l$. В этом случае из (1.1) и (1.2) следует, что степень моделирования равна 6. Можно также представить себе случай, когда величина m вообще не меняется при изменении масштаба взрыва. Это, по-видимому, будет иметь место при взрывах в очень твердых породах с постоянной по величине забивкой. Таким образом, в общем случае мы можем написать формулу моделирования для направленного взрыва в виде

$$\frac{E\mu}{\rho^2 g l^n} = \text{const}$$

где μ — величина, зависящая от свойств грунта и от величины забивки, показатель моделирования n изменяется в пределах

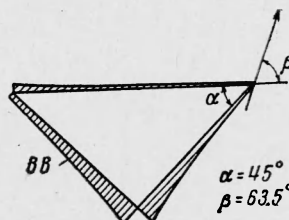
$$3.5 \leq n \leq 7$$

Экспериментальные взрывы производились в известняке 6-й категории прочности по схеме фиг. 1 при глубине по нормали равной 2.1, 4.2, 5.7 м. Удельный расход ВВ в первом опыте составлял 3 кг/м^3 . Изменение общего количества ВВ при переходе к более крупным масштабам показан на фиг. 2, где две прямые ограничивают область изменения показателя моделирования. Результаты этих взрывов изображены на фиг. 3 в виде схематических профилей воронок и развалов грунта.

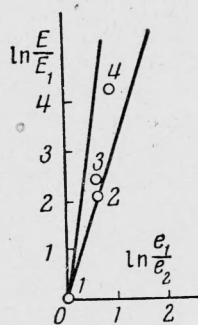
Сравнивая результаты экспериментов, видим, что несмотря на большие значения показателя моделирования, принятые при расчете, воронки и развалы грунта получились не подобными: при увеличении масштаба взрыва относительное количество грунта, выброшенного из воронки, уменьшается. Так как при переходе от глубины 2.1 м к глубине 5.7 м величина n была принята равной 4.8, из этого следует, что в данном случае показатель моделирования заключен в пределах

$$5 \leq n \leq 7$$

Столь большие значения показателя моделирования приводят к резкому перерасходу ВВ при направленном взрыве по сравнению с обычными

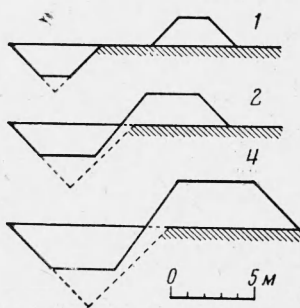


Фиг. 1



Фиг. 2

взрывами на выброс. Следует, однако, иметь в виду, что в мягком грунте роль забивки менее существенна, так что n меняется в более узком интервале между 3.5 и 4. При взрывах же в скальном грунте роль забивки очень важна, что необходимо иметь в виду на практике вообще, а при направленном взрыве — в особенности. При осуществлении достаточно надежной забивки расход ВВ может быть значительно снижен.



Фиг. 3

2. Влияние прочностных свойств среды при направленном взрыве. Теоретическая схема направленного взрыва [1] основана на модели идеальной несжимаемой жидкости. Рассматривая грунт как идеальную несжимаемую жидкость, принимаем во внимание только инерционные силы, возникающие при взрыве, пренебрегая его прочностными свойствами. Такой подход позволяет ухватить основные черты явления, полагая, что влияние других факторов, в частности прочности, можно рассматривать как поправки к основной модели.

Опытные взрывы в глинистом грунте [2] подтвердили правильность этого подхода. Вместе с тем был обнаружен ряд деталей, которые не укладывались в рамки модели идеальной несжимаемой жидкости и нуждались в своем объяснении привлечения прочностных характеристик грунта. Так, в опытах 25 и 26 работы [2] при одинаковом масштабе и законе расположения расход ВВ во втором случае был вдвое больше.

Согласно общей теории и изложенному в первом разделе можно было бы ожидать, что дальность броска во втором случае увеличится в два раза по сравнению с первым. В действительности же оказалось, что дальность выброса увеличилась более чем втрое. Качественно этот результат можно объяснить следующим образом. По теории для осуществления направленного выброса нужно весь объем грунта обкладывать сплошным слоем ВВ. На практике ВВ располагается в скважинах, расположенных по контуру выбрасываемого объема грунта на некотором расстоянии друг от друга, так что между скважинами грунт остается ненарушенным.

Для отрыва метаемой массы грунта от массива требуется совершить некоторую работу, пропорциональную поверхности выбрасываемого объема грунта. Очевидно, что в приведенном выше примере величина этой работы остается постоянной, поскольку масштаб взрывов не меняется. Таким образом, во втором случае на сообщение грунту кинетической энергии была затрачена относительно большая часть всей энергии ВВ.

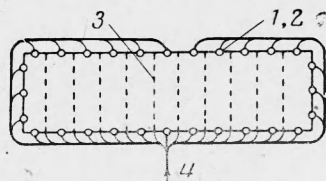
Приведем еще один пример. В этом же грунте был пробурен ряд скважин под углом 45° , на дне которых были расположены сосредоточенные заряды ВВ. В результате подрыва большая часть грунта была выброшена в сторону наклона скважин — небольшое нарушение сплошности массива со стороны скважин существенно повлияло на направление выброса.

Еще более значительно сказывается влияние прочностных свойств среды при взрывах в скальных породах. В ходе опытов было обнаружено одно интересное обстоятельство. Оказалось, что направление выброса зависит от места инициирования зарядов. Дело в том, что на практике заряды ВВ, расположенные в скважинах, удобно соединять между собой детонирующим шнуром, а подрыв производить из одного места. Схема инициирования, применявшаяся в опытах в скальном грунте, показана на фиг. 4, где 1 и 2 — скважины зарядов 1 и 2, цифрой 3 указана канавка заряда 3, а 4 — начало инициирования; начало инициирования располагалось как со стороны заряда 1, так и со стороны заряда 2. В обо-

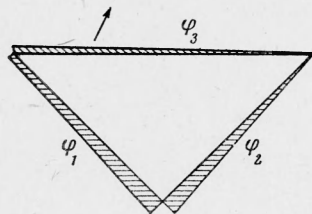
их случаях выброс грунта происходит в ту сторону, откуда начинается инициирование. Скорость детонации есть величина порядка нескольких тысяч метров в секунду, а скорость грунта в данных опытах составляла всего лишь несколько десятков метров в секунду.

Таким образом, за время, в течение которого детонация распространяется на все заряды ВВ, выбрасываемый объем грунта не изменит существенно своей формы. Следовательно, причину наблюдаемого эффекта следует искать в другом.

Отметим здесь, что аналогичное явление при взрыве в мягком грунте было обнаружено С. А. Давыдовым [5]. В наших опытах линейные размеры выбрасываемой массы грунта были таковы, что отношение длины траншеи к ее ширине равнялось четырем. Если принять скорость детонации в детонирующем шнуре равной $7-8 \text{ км/сек}$, а скорость ударной волны в грунте $3-4 \text{ км/сек}$, то за время замедления, в течение которого



Фиг. 4



Фиг. 5

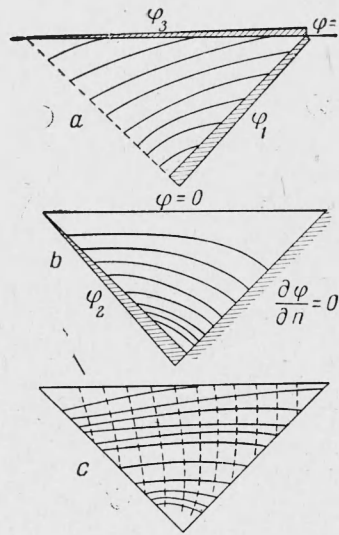
детонация распространится от первого заряда до последнего, ударная волна успеет обогнать весь выбрасываемый объем грунта.

С другой стороны, известно, что в начальной стадии газы — продукты детонации расширяются по закону $pV^3 = \text{const}$. Отсюда следует, что большую часть работы продукты детонации совершают именно в начальной стадии расширения. Так, при увеличении радиуса скважины на 20% потенциальная энергия газов составляет всего лишь 47% началь-

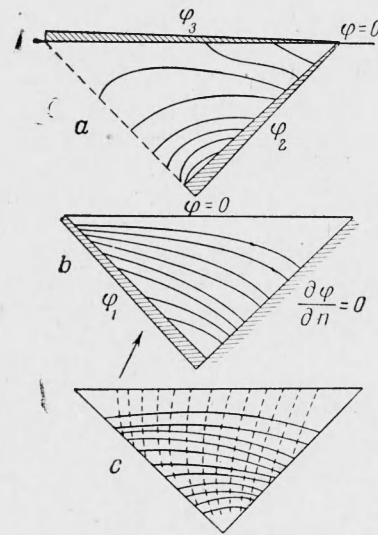
ной, а остальное передано грунту. Так как в начальный момент скорости расширения велика, то за время замедления заряды, синицированные вначале, могут почти полностью «выработаться», т. е. передать свою энергию грунту. Эта энергия расходуется на разрушение грунта и на создание в нем поля скоростей. Таким образом, влияние неодновременности подрыва проявляется в двух отношениях — энергетическом и кинематическом. С точки зрения энергетической, заряд, подрываемый в начале, производит большую часть разрушения выбрасываемой массы грунта и отрыв ее от массива, но за счет этого скорости, приобретаемые грунтом, получаются по величине меньшими, чем по схеме идеальной несжимаемой жидкости. Заряд же, подрываемый позднее, передает свою энергию уже разрушенному и оторванному от массива грунту и, следовательно, определяет направление выброса. Кинематически влияние неодновременности подрыва проявляется в создании новых граничных поверхностей и изменении граничных условий на поверхности выбрасываемого объема грунта. Этот вопрос можно рассмотреть в рамках идеальной несжимаемой жидкости. В опытах авторов выбрасываемый объем грунта имел в разрезе форму треугольника, а выброс производился под углом $63,5^\circ$. Распределение потенциала на границе области для данного случая показано на фиг. 5, где стрелкой указано направление взрыва.

Рассмотрим два случая. В первом подрываются заряды 1 и 3 (это соответствует подрыву со стороны заряда 1), а затем заряд 2, причем в результате взрыва зарядов 1 и 3 образуется свободная поверхность на месте заряда 3 и линия тока на месте заряда 1. Во втором случае сначала подрываются заряды 2 и 3, а затем — заряд 1, причем на месте зарядов 2 и 3 образуется, соответственно, линия тока и свободная поверхность. Последовательно образующиеся поля скоростей и суммарные поля ско-

ростей показаны на фиг. 6 и 7. Направление выброса при одновременном подрыве зарядов показано на этих фигурах стрелками, сплошные линии — эквипотенциали, пунктирные — линия тока. Картины течений получены на интеграторе ЭГДА-9-60. Неодновременность подрыва с кинематической точки зрения приводит к увеличению угла выброса, так что основная



Фиг. 6



Фиг. 7

масса грунта приобретает скорости, направленные почти вертикально вверх. Вследствие развитых выше энергетических соображений заряд, подрываемый позднее, сообщает грунту относительно большие скорости, чем при одновременном подрыве. Таким образом, в первом случае грунт может быть выброшен в направлении, противоположном тому, которое имеет место при одновременном подрыве. Во втором случае (при подрыве со стороны заряда 2) выброс должен происходить в нужном направлении. Эти выводы были подтверждены экспериментами.

3. Применение замедленного взрывания при направленном выбросе. На практике в некоторых случаях выгоднее применять замедленное взрывание при направленном выбросе, так как это приводит к уменьшению расхода ВВ на единицу объема грунта.

Оставляя открытым вопрос о временах замедления, можно теоретически рассмотреть два крайних случая: а) из зарядов, расположенных в грунте, первоначально подрываемый заряд отрывает объем от массива и создает на своем месте свободную поверхность (этот случай будет, по-видимому, иметь место при больших временах задержки); б) первоначально подрываемый заряд не отрывает грунт от массива и не создает новой поверхности. Учитывая прочность грунта вне выбрасываемого объема вследствие подпора со стороны массива, можем принять во втором случае, что на месте первоначально взорванного заряда образуется линия тока. Этот случай рассмотрен выше.

Пусть область, как и прежде, представляет собой треугольник (фиг. 5). Введем следующие обозначения: φ_i — потенциал, соответствующий поступательному движению выбрасываемой массы грунта в заданном направлении; Φ_i — импульс, создаваемый i -м зарядом ВВ, Φ_{ik} — импульс, получающийся на месте i -го заряда при взрыве одного k -го заряда. Величины i и k

пробегают значения 1, 2, 3. Чтобы в результате подрыва всех зарядов грунт получил поступательное движение, необходимо выполнить следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\Phi_1 + \Phi_{12} + \Phi_{13} &= \varphi_1 \\ \Phi_2 + \Phi_{21} + \Phi_{23} &= \varphi_2 \\ \Phi_3 + \Phi_{31} + \Phi_{32} &= \varphi_3\end{aligned}\quad (3.1)$$

Заряд 3 находится на свободной поверхности, поэтому

$$\Phi_{31} = \Phi_{32} = 0 \quad (3.2)$$

и, следовательно, $\Phi_3 = \varphi_3$, т. е. величина заряда 3 остается такой же, как при одновременном подрыве. В случае а), кроме того, заряды 1 или 2 создают свободные поверхности в зависимости от того, какой из них взрывается первым. Если последовательность взрывания 2-1-3, то

$$\Phi_{21} = \Phi_{23} = 0, \quad \Phi_2 = \varphi_2$$

Таким образом, при этом порядке взрывания заряд 2 также не меняет своей величины по сравнению со случаем одновременного взрывания, а заряд 1 должен иметь величину $\Phi_1 = \varphi_1 - (\Phi_{12} + \Phi_{13})$, т. е. вес заряда 1 должен быть меньше, чем при одновременном подрыве. По этому методу можно произвести расчет для любой последовательности подрыва зарядов. В частности, наиболее выгоден с точки зрения расхода ВВ следующий порядок подрыва: 3-2-1. В случае б) оба заряда, находящиеся в грунте, изменяют величину по сравнению со случаем одновременного подрыва. Метод расчета остается тем же. Задача, однако, осложняется тем, что вновь образующихся поверхностях граничные условия заранее неизвестны. Тем не менее, и в этом случае неодновременное взрывание может привести к уменьшению расхода ВВ. Ниже в качестве иллюстрации приведена задача, рассмотренная Е. Н. Шером.

Пусть требуется из полупространства, заполненного идеальной несжимаемой жидкостью, метнуть вверх с единичной поступательной бесконечный цилиндр, сечение которого — половина единичного круга (фиг. 8)

$$z = e^{i\theta} \quad (-\pi \leq \theta \leq 0) \quad (3.3)$$

Комплексный потенциал такого течения есть z/i . Это течение предполагаем получить как сумму двух течений с потенциалами w_1 и w_2 .

Первое течение есть результат приложения импульсной нагрузки на дуге BC , второе — на дуге AB . Область течения в первом случае — нижняя полуплоскость с вырезанной дугой BC , во втором — нижняя полуплоскость с вырезанной дугой AB . В обоих случаях на действительной оси $\varphi = 0$. Требуется определить функции φ_1 и φ_2 на дугах BC и AB , так, чтобы в полукруге (3.3) выполнилось условие

$$w_1(z) + w_2(z) = \frac{z}{i} \quad (3.4)$$

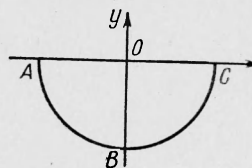
Вследствие симметрии задачи имеем

$$w_2(z) = \overline{w_1(-\bar{z})} \quad (3.5)$$

где $\overline{w(z)}$ — функция, сопряженная $w(z)$. Условие (3.4) примет вид

$$w_1(z) + \overline{w_1(-\bar{z})} = \frac{z}{i} \quad (3.6)$$

Отметим, что при любой импульсивной нагрузке, распределенной по дуге окружности с центром действительной оси, остальная часть окружности является линией тока, если потенциал на границе полуплоскости равен 0. Это утверждение становится очевидным, если сделать дробно-ли-



Фиг. 8

нейное преобразование, переводящее одну точку пересечения окружности с действительной осью в 0, а другую в бесконечность. Легко убедиться, что окружность переходит при этом в ось симметрии новой полуплоскости. Используя это свойство, можно принять, что $\psi_1 = 0$ на дуге AB . Выпишем условие (3.6) для точки $\xi = e^{i\theta}$, лежащей на дуге BC ; имеем

$$\varphi_1(\xi) + i\psi_1(\xi) + \varphi_1(-\bar{\xi}) - i\psi_1(-\bar{\xi}) = y - ix \quad (3.7)$$

Отсюда

$$\varphi_1(\xi) + \varphi_1(-\bar{\xi}) = y, \quad \psi_1(\xi) - \psi_1(-\bar{\xi}) = -x \quad (3.8)$$

Но $\psi_1(-\bar{\xi}) = 0$, так как точка $-\bar{\xi}$ лежит на дуге AB . Покажем, что функция $w(z)$, удовлетворяющая граничным условиям

$$\varphi = 0 \text{ при } y = 0, \quad \psi = 0 \text{ на } AB, \quad \psi = -x \text{ на } BC \quad (3.9)$$

единственна. Введем в рассмотрение функцию

$$Y(z) = w_1(z) + \overline{w_1(-\bar{z})} - \frac{z}{i} \quad (Y(0) = 0)$$

Для этой функции имеем

$$\operatorname{Re} Y = 0 \text{ при } y = 0, \quad \operatorname{Im} Y = 0 \text{ на } AB, \quad \operatorname{Im} Y = 0 \text{ на } BC$$

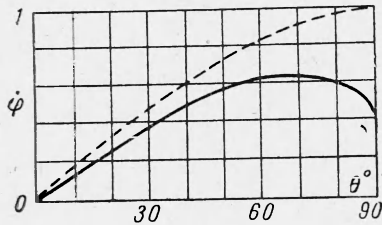
Такая смешанная задача имеет, [6], единственное решение $Y = 0$.

Решение задачи с граничными условиями (3.9) находится при помощи интеграла Пуассона для круга [6] и имеет следующий вид:

$$\varphi = \frac{\sin \theta}{2} + \frac{\cos \theta}{2\pi} \ln \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \quad (3.10)$$

В случае одновременного взрывания потенциал, обеспечивающий поступательное движение единичного полукруга вертикально вверх, имеет вид

$$\varphi = \sin \theta \quad (3.11)$$



Фиг. 9

На фиг. 9 сплошной линией показано распределение потенциала при неодновременном взрывании, а пунктиром — при одновременном.

Площади, ограниченные соответствующими кривыми, характеризуют собой суммарный импульс, сообщаемый выбрасываемому объему грунта одним из зарядов ВВ. Если обозначить через J' — импульс, сообщаемый при одновременном подрыве, а через J'' — при неодновременном, то из фиг. 9 имеем $J'/J'' = 1.3$. Если принять, далее, что импульс связан с весом ВВ соотношением (1.2), то $E'/E'' = 1.69$ и, экономия в расходе ВВ составит в случае замедленного взрывания почти 70%.

В экспериментальных работах от ПЭУ Союзвзрывпром принимали участие Е. Горбачева и Е. Клюквин.

Поступила 16 I 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А., Кузнецов В. М., Шер Е. Н. О направленном выбросе грунта при помощи ВВ. ПМТФ, 1960, № 4.
2. Кузнецов В. М., Шер Е. Н. Экспериментальное исследование направленного взрыва в грунте. ПМТФ, 1962, № 3.
3. Покровский Г. И. Основные предпосылки для расчета крупных зарядов ВВ на выброс. Сб. статей «Взрывные работы», 1956, вып. 3.
4. Седов Л. И. Методы теории подобия и размерностей в механике. Изд. 4, 1957.
5. Давыдов С. А. Взрывной метод проходки канав с направленным выбросом. Сб. статей «Взрывное дело», 1939, вып. 37.
6. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теорий функций комплексного переменного. 1958.