

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОГО
ВЗРЫВА В ГРУНТЕ

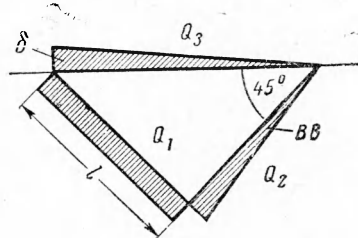
В. М. Кузнецов, Е. Н. Шер

(Новосибирск)

В работе [1] был предложен новый способ расположения взрывчатого вещества (ВВ) в грунте, обеспечивающий теоретически полную направленность выброса. Летом 1961 г. Институт гидродинамики и трест «Союзвзрывпром» провели совместную работу по экспериментальному изучению предложенного метода. Ниже приводятся результаты этих исследований.

Работы проводились в глинистом грунте естественного залегания. В качестве ВВ в зарядах применялся аммонит № 6ЖВ и 6.

Исследовались в основном две схемы расположения ВВ: «треугольник» (фиг. 1) и «слой» (фиг. 2). Для предотвращения разлета грунта в стороны от основного направления выброса объем грунта обкладывался ВВ с торцов (фиг. 3). Линейные размеры во всех опытах, кроме № 7 (табл. 1), имели следующие величины: $l = 2.8$ м, $L = 12$ м, $l_1 = 2$ м. Заряды



Фиг. 1

Q_1 , Q_2 и Q_4 располагались в шпурах, пробуренных под углом 45° к горизонту (схема треугольник) или горизонтально (заряд Q_2 в схеме слой). Заряд Q_3 располагался в канавках глубиной 20 см с песчаной забивкой.

Расстояние между шпурами и канавками варьировалось от 0.5 до 1 м. Иницирование зарядов осуществлялось при помощи детонирующего шнура. Порядок иницирования был произвольным. Соотношение между общими весами зарядов рассчитывалось по формулам

$$Q_1 : Q_2 : Q_3 : Q_4 = 1 : \frac{1}{2} : \frac{\sqrt{2}}{2} : \frac{l}{3L} \quad (1)$$

для схемы треугольник, и

$$Q_1 : Q_2 : Q_3 : Q_4 = 1 : \frac{l_1}{2l} : \frac{l_1}{2l} : \frac{l_1}{3\sqrt{2}L} \quad (2)$$

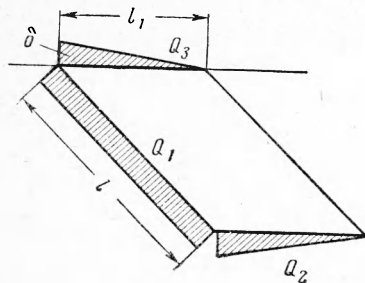
для схемы слой.

Линейный закон распределения ВВ осуществлялся патронированием зарядов в соответствии с формулой

$$q_i = q_0(2i - 1) \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

Здесь q_i — вес патрона на i -й ступени, q_0 — вес патрона на 1-й ступени.

Почти каждый взрыв регистрировался на киноленте со скоростью 30—60 кадров в секунду. Разлет грунта изучался при помощи полых металлических банок с удельным весом, равным удельному весу грунта (примерно 2 г/см^3), закладываемых в различных частях выбрасываемого объема грунта. После взрыва эти банки разыскивались при помощи мино-



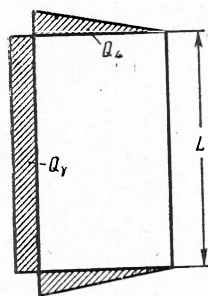
Фиг. 2

Таблица

Номер опыта	Взрыв по схеме фигуры	Вес зарядов, кг				Общий вес ВВ, кг	Параметры воронки				Расход ВВ на 1 м ³ грунта, кг/м ³	Параметры выброса			
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄		глубина, м	ширина, м	длина, м	объем, м ³		видимая длина, м	ширина навала, м	максимальная толщина навала, м	направленность выброса, %
1	1	225	112.5	160	3	503.5	2.1	5.7	14.3	70.4	7.2	26.3	15.8	0.5	84.5
2	1	225	112.5	160	18.6	535.1	2.2	6.0	15.7	88	6.1	30	15	0.5	89
3	1	225	0	0	0	225	1.5	4.4	14.7	48.7	7.1	50	17	0.2	65
4	1	130	66	80	11	298	1.7	4.4	15.7	60.7	4.9	35	5	0.9	79
5	1	130	66	80	0	276	1.7	5.5	13.3	56.5	4.9	18	17	0.5	73
6	1	117	66	160	0	343	1.4	4.8	14.3	48	7.4	18	18	0.7	94
7	1	45	23	32	5.7	111.4	1.3	3.5	7.5	14.6	7.6	20	6	0.3	96
8	1	108	30	80	6	230	1.4	4.0	12.5	64	3.4	13	12	0.7	94
9	1	108	0	80	4.5	197	1.0	3.6	12.5	29.0	6.8	14	12	0.3	90
10	1	324	198	465	13.6	1014	1.9	6.6	15.7	90.6	11	12	18	0.7	62
11	1	324	198	233	13.6	782	1.9	6.7	15	80	9.6	14.5	14	0.6	54
12	1	324	198	465	13.6	1014	2.1	6.6	14.4	79	13	14	16	0.5	68
13	1	252	76	176	0	504	1.5	5.3	14.7	71	7.0	20.5	27	0.6	88
14	1	252	0	176	0	428	1.7	4.6	13.5	44	10	33	14	0.9	68
15	2	164	0	58	7	236	1.9	9.5	14.7	34	6.9	48	17	0.2	75
17	2	164	29	58	7	265	2.6	8.3	14.4	62	4.3	67	17	0.2	91
18	2	154	58	117	7	343	3.2	11.5	14.5	54	6.4	90	23	0.3	98
19	13	255	0	91	10.6	367	2.2	14.3	14.4	52	7.0	82	25	0.3	86
23	10	120	43	60	7	237	1.7	4.6	14.4	62	3.8	20	19	0.4	96
25	10	90	43	28	7	175	1.9	4.1	13.3	45	3.9	15.5	16	1.0	94
26	10	191	90	57.6	11.1	361	1.9	5.4	14.6	64	5.7	31	14	0.4	87
29	10	382	180	115.2	12.4	702	2.0	6.0	17	101	6.9	49	13	0.7	85
30	10	90	43	60	7	237	1.8	4.7	14.2	57.7	3.0	20.5	15	0.9	98
31	1	120	0	0	0	120	1.2	3.5	13.5	33	3.7	21.5	15	0.3	92

искателя. После каждого взрыва производился промер профилей образовавшейся воронки и навала. Вес зарядов, общие размеры воронки, а также характерные размеры навала приведены в табл. 1.

В качестве величины, характеризующей направленность выброса, в таблице приведено отношение объема направленно выброшенного грунта к объему образующейся воронки. Следует отметить, что эта величина неточно характеризует направленность взрыва, так как объем воронки превосходит объем, заранее обкладываемый ВВ, вследствие уплотнения и выпучивания грунта. Доля объема воронки, получаемая за счет этих факторов, растет с увеличением общего веса ВВ при сохранении линейных размеров выбрасываемой массы грунта. Поэтому направленность взрыва, приведенная в табл. 1, уменьшается с увеличением веса ВВ.



Фиг. 3

На самом же деле, как показывают опыты с изучением разлета при помощи банок, фактическая направленность выброса во всех случаях составляла 100%, т. е. весь грунт, обкладываемый ВВ, летит в заданном направлении.

Навал, образующийся на противоположной выбросу стороне воронки и по ее бокам, образуется из грунта, расположенного за пределами контура, обкладываемого ВВ.

Два опыта 3 и 31 с односторонним заложением ВВ в шпурах, расположенных под углом 45° к горизонту, были проделаны по схеме, предложенной в работе [2]. Направленность выброса при этом получается вполне удовлетворительной, однако разлет грунта настолько велик, что при больших расходах ВВ профиль воронки, на первый взгляд, ничем не отличается от профиля, получающегося при взрыве сосредоточенного заряда: (фиг. 4). Разлет грунта в этом случае (опыт 31) показан на фиг. 5

(цифры указывают расстояния в m , на которые перемещается соответствующая часть выбрасываемого объема).

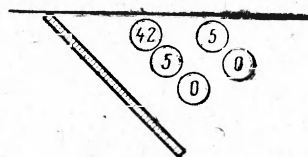
Характерной особенностью односторонних взрывов является также то, что максимальная толщина навала находится на краю воронки (фиг. 4). Располагая ВВ по линейному закону (фиг. 1), удастся значительно уменьшить разлет грунта и изменить форму навала. При этом, однако, оказа-



Фиг. 4

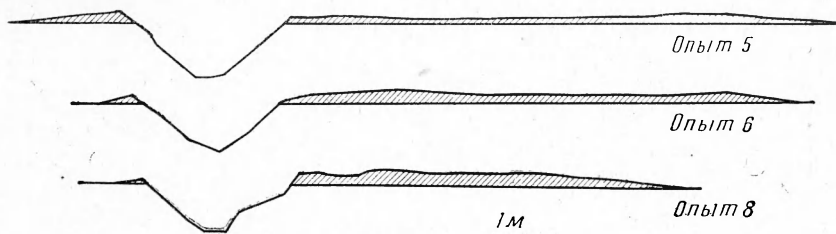
лось, что лучшие результаты в данных условиях получаются при несколько ином соотношении между величинами зарядов, чем это следует из формулы (1).

Кучность навала улучшается при увеличении заряда Q_3 (опыт 6) или уменьшении заряда Q_2 (опыт 8) в два раза по сравнению с расчетной величиной. Соответствующие профили приведены на фиг. 6 вместе с профилем, полученным в опыте 5 с расчетным значением всех зарядов. Торцовые заряды Q_4 при расчетной величине также работают сильнее, чем нужно, вызывая сжатие навала в направлении, перпендикулярном выбросу. На фиг. 7 и 8 показан разлет грунта в опытах 7 (расчетное значение зарядов Q_4) и 8 (заряды Q_4 уменьшены в два раза по сравнению с расчетной величиной). Цифры на этих фигурах указывают положение банок в объеме грунта и навале. В опыте 7 банки закладывались на глубине 30 см. Расположение банок в опыте 8 указано на фиг. 8 в поперечных разрезах. Продольный и поперечный профили навала, получающиеся при расчетных значениях зарядов Q_4 , показаны на фиг. 9 (опыт 4).



Фиг. 5

Опыты 10—14 были проведены по той же схеме фиг. 1, но при большем удельном расходе ВВ. При увеличении расхода ВВ разброс грунта возрастает. Заметного улучшения кучности выброса за счет изменения величины зарядов Q_2 и Q_3 в этом случае получить не удалось.



Фиг. 6

Из теории [1] следует, что при направленном взрыве ВВ должно быть распределено так, чтобы на поверхности выбрасываемого объема грунта был создан линейный импульс в направлении метания. Если предположить, что импульс, сообщаемый ВВ, пропорционален его толщине, то отсюда следует, что для получения поступательного движения грунта толщина ВВ должна убывать по линейному закону в направлении метания. Это предположение, однако, не всегда справедливо. Рассмотрим одномерный случай. Пусть слой ВВ толщины h одной стороной сопри-

касается с твердой стенкой, а другой — с вакуумом. Обозначим через ϵ удельную внутреннюю энергию ВВ, ρ — плотность ВВ.

Тогда из соображений размерности для импульса I , действующего на твердую стенку, получим

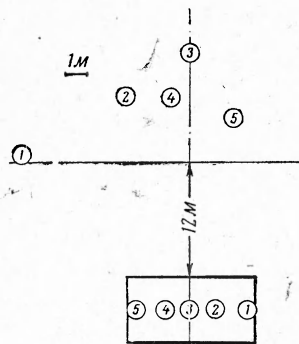
$$I = \text{const} \sqrt{\epsilon \rho} h \quad (4)$$

Точное решение задачи с $\gamma = 3$ при условии мгновенной детонации дает

для const значение $\sqrt{3/2}$. Таким образом, в том случае, когда «носителем» импульса являются продукты детонации, предположение о линейной зависимости импульса от толщины ВВ выполняется.

Иное положение имеет место, если ВВ работает с забивкой, масса которой во много раз превышает массу продуктов детонации. В этом случае можно считать, что вся энергия ВВ идет на сообщение импульса забивке. Если материал забивки несжимаем, то, обозначая через m массу забивки на единицу площади, получим

$$I = \sqrt{\epsilon m} h^{1/2} \quad (5)$$



Фиг. 7

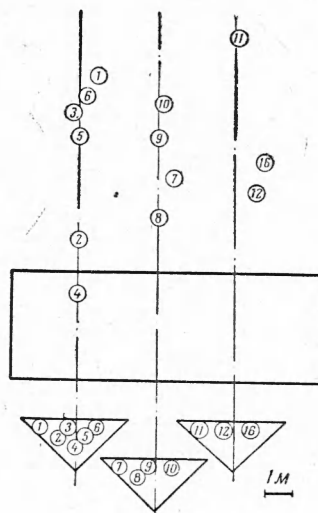
Если масса забивки постоянна по длине, то для осуществления линейного импульса, толщину ВВ следует изменить по квадратичному закону. В наших экспериментах все заряды работали с забивкой, причем заряд Q_3 (фиг. 1) с забивкой, постоянной по длине. Что касается Q_1 и Q_2 , то импульс, сообщаемый ими, зависит от геометрии области и свойств ВВ и среды. В общем случае задача о передаче импульса взрывчатим веществом среде неотделима от задачи о движении среды. Тем не менее был проделан ряд опытов (23, 25, 26, 29, 30), в которых все заряды были распределены по квадратичному закону. В этом случае для броска под углом 45° веса зарядов

$$Q_1 : Q_2 : Q_3 : Q_4 = 1 : \frac{1}{3} : \frac{\sqrt{2}}{3} : \frac{i}{4L} \quad (6)$$

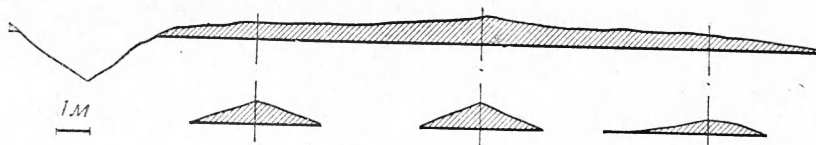
Патронировка зарядов производится по формуле (q_i — вес i -й ступени)

$$q_i = q_0 [i^3 - (i-1)^3] \quad (i=1, 2, 3...) \quad (7)$$

В опыте 23 выброс производился под углом 45° к горизонту. В опытах 25 (30), 26 и 29 угол выброса составлял примерно 60° . Расчет зарядов



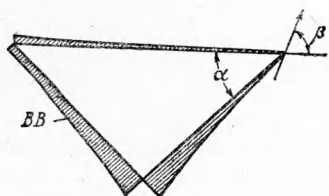
Фиг. 8



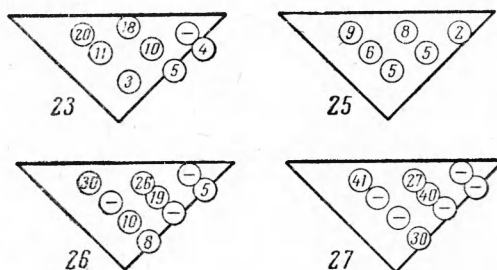
Фиг. 9

в этих опытах производился аналогично опытам под углом выброса 45° . Здесь не приводится формула для расчета зарядов при выбросе под углом, большим 45° . Отметим только, что заряд Q_1 в этом случае не остается постоянным по длине, а увеличивается книзу (фиг. 10).

Разлет грунта в опытах 23, 25, 26, 29 показан на фиг. 11 (цифры указывают расстояние в м). Лучший результат в схеме треугольник был получен в опыте 25, профиль которого изображен на фиг. 12. Расход ВВ в этом опыте составил 3.9 кг/м^3 . Для данного грунта при обычном взрыве сосредоточенного заряда на выброс расход ВВ равен 3.3 кг/м^3 . В опыте 30, который представлял собой повторение опыта 25, расход ВВ составил 3 кг/м^3 .



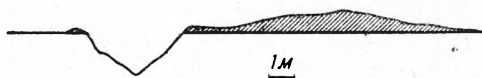
Фиг. 10



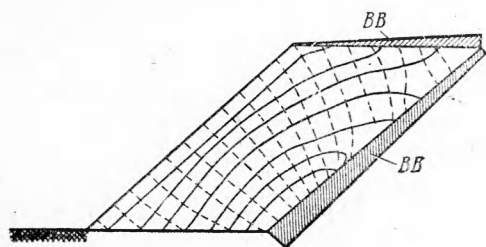
Фиг. 11

В опытах 26 и 29, выполненных по схеме опыта 25, общий вес ВВ был увеличен по сравнению с опытом 25 соответственно в два и четыре раза. Удовлетворительной кучности выброса в этих опытах получить не удалось.

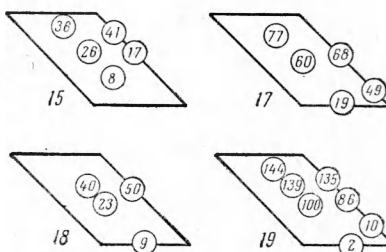
Переходим к описанию экспериментов, выполненных по схеме слой (фиг. 2). Всего таких экспериментов было произведено четыре: 15, 17, 18, 19. В опыте 15 нижний заряд Q_2 отсутствовал, в опыте 17 этот заряд составлял половину расчетного. В опыте 18 заряды Q_1 и Q_2 имели расчетные величины, а заряд Q_3 был увеличен вдвое по сравнению с расчетной величиной. Схема опыта 19 изображена на фиг. 13, где сплошные линии — эквипотенциали, а пунктир — линии тока. Нижний заряд в этом опыте отсутствовал, а основной заряд Q_1 увеличивался книзу. Эта схема была вначале просчитана на интеграторе ЭГДА-9/60. Картина течения показана на фиг. 13. В опытах по схеме слой все заряды распределялись по линейному закону. Разлет грунта показан на фиг. 14 (цифры указывают расстояние в м). Опыты 17, 18, 19 были проведены один



Фиг. 12



Фиг. 13

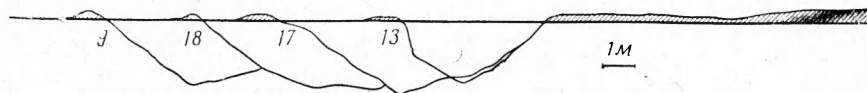


Фиг. 14

за другим на краю траншеи, образованной взрывом по схеме треугольник; профили последовательно полученных воронок в опытах 17, 18, 19 и в опыте 13 показаны на фиг. 15. Таким способом была образована выемка размером $15 \times 15 \times 2.5 \text{ м}$. Получение выемок большой протяженности и сравнительно малой глубины при помощи взрыва имеет большое практическое значение. Взрывами сосредоточенных зарядов такая задача прин-

ципально не может быть решена, так как грунт, выброшенный каждым последующим взрывом, засыпает воронку, образованную предыдущим. При помощи направленного взрыва удастся осуществить переброску грунта, причем, как видно из фиг. 15, без существенного осыпания.

Схема слоев требует меньших расходов ВВ по сравнению со схемой треугольник и поэтому может быть рекомендована для осуществления массовых направленных взрывов на практике.

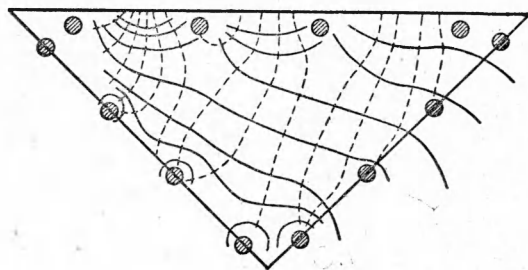


Фиг. 15

Выводы. 1. Расположение ВВ по способу, предложенному в работе [1], обеспечивает полную направленность выброса при взрыве. Опытные данные по разлету грунта показывают, что весь грунт из объема, обложенного ВВ, летит в заданном направлении. Однако имеется большой разброс грунта в направлении метания. Этот разброс может быть уменьшен при изменении закона расположения ВВ. Наилучший результат был получен в опыте 25 с квадратичным законом расположения ВВ и углом выброса 60° .

2. При направленном метании грунта на небольшие расстояния расход ВВ сравним с расходом ВВ при обычном взрыве на выброс.

3. При переброске грунта на большие расстояния в данной серии опытных взрывов не удалось получить удовлетворительной кучности навала. Причиной возрастания разброса при увеличении расхода ВВ, на наш взгляд, являются те отступления от теоретической схемы, которые имеют место в практике. В первую очередь это относится к размещению зарядов не сплошным слоем, а в шпурах и канавках. На интеграторе ЭГДА-9/60 был проведен расчет поля скоростей в схеме идеальной



Фиг. 16

несжимаемой жидкости при дискретном распределении импульса на поверхности выбрасываемого объема. Это поле скоростей для схемы треугольник показано на фиг. 16, из которой видно, что участки свободной поверхности, остающиеся между канавками, сильно искажают поле скоростей (сплошные линии — эквипотенциали, пунктир — линии тока). Скорости различаются по величине в 4—5 раз, что приводит к разбросу по длине в 16—25 раз. Влияние шпуров, однако, оказывается на глубине порядка расстояния между шпурами. В данных экспериментах эта область влияния шпуров занимала, примерно, половину выбрасываемого объема грунта. Ясно, что с увеличением масштаба взрывов роль этого поверхностного эффекта должна уменьшаться.

В работе принимали участие Е. П. Горбачева и А. В. Петров.

Работа выполнена под руководством М. А. Лаврентьева, которому авторы приносят искреннюю благодарность.

Поступила 3 I 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А., Кузнецов В. М., Шер Е. Н. О направленном метании грунта при помощи ВВ. ПМТФ, 1960, № 4.
2. Давыдов С. А. Взрывной метод проходки каналов с направленным выбросом. Взрывное дело, 1940, вып. 37.