

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

КАРШИНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет нефти и газа направление бакалавриата
5540200 - «Горное дело»

На правах рукописи
УДК 622.235(043.3)

Жуманазаров Сирожиддин Сафаралиевич

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

на тему:

«Определение основных параметров навала грунта на основе изучения
динамики взрыва траншейных зарядов выброса для повышения их
эффективности открытых горных работах»

Выполнил:

подпись

Жуманазаров С.С.

Руководитель:

подпись

д.т.н. Носиров У.Ф.

*«Работа рассмотрена и
допускается к защите»*

Зав. кафедрой:

_____ доц. Т.Н.Ярбобоев

подпись

«_____» _____ 2013 год

«Отправлено к защите ГАК»

Декан факультета:

_____ доц. З.У.Суннатов

подпись

«_____» _____ 2013 год

Карши - 2013

КАРШИНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Зав. кафедры «ГиРНГМ»
_____ доц. Т.Н.Ярбобоев
«_____» _____ 2013 год

ЗАДАНИЕ на выпускную квалификационную работу

Студент: ***Жуманазаров Сирожиддин Сафаралиевич***

1. Тема работы: Определение основных параметров навала грунта на основе изучения динамики взрыва траншейных зарядов выброса для повышения их эффективности открытых горных работах

Тема назначена приказом института № 558/Т от 29.11.2012

2. Срок сдачи выпускной работы: _____

3. Литературные источники для выпускной работы: *Работников Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука 1988. 712 с*

Седов Л.И. Механика сплошной среды в 2-х томах. 4-изд.-М.: Наука, 1983.

4. Содержание выпускной работы:

Анализ выполненных исследований образования навала выброшенного грунта взрывами траншейных зарядов выброса

Математическое моделирование действия траншейных зарядов выброса в грунтах

Теоретические исследования динамики взрывов обвалованного грунтом траншейных зарядов выброса.

5. Перечень чертежей:

1. Максимальное давление во фронте ударной волны

2. Изменение максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от расстояния до места взрыва при различных содержаниях воздуха в грунтовом массиве

3. изменение максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от массы заряда в при различных содержаниях воздуха в грунтовом массиве

4. Изменение времени действия максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от удельного импульса давления при различных содержаниях воздуха в грунтовом массиве

5. схема развития газовой полости взрыва, обвалованного грунтом траншейного заряда выброса в грунтовом массиве

6. схема определения кинематических параметров движения грунтового потока при взрыве обвалованного грунтом линейных зарядов выброса

7. дальность бросания и высота подъема грунтового потока в зависимости от их времени бросания

8. дальность бросания грунтового потока в зависимости от угла обваловки линейных зарядов выброса грунтом, удельного расхода, а также плотности грунтового массива

6. Консультант по выпускной работе: Фурсов А.И.

7. Календарный план

Дата	Раздел выпускной работы	Объем, страниц	Общий процент выполнения, %	Дата выполнения раздела
27.05.13	Введение	5	6,7	28.05.13
29.05.13	Анализ литературных данных	15	27	02.06.13
03.06.13	Обзор и анализ разработанных методик инженерных расчета основных параметров траншейных зарядов выброса	11	41,86	04.06.13
04.06.13	Цель и задачи исследования	1	43,1	04.06.13
05.06.13	математическое моделирование действия траншейных зарядов выброса в грунтах	17	66,07	10.06.13
11.06.13	теоретические исследования динамики взрывов обвалованного грунтом траншейных зарядов выброса.	23	97.15	14.06.13
15.06.13	Заключение	2	100	15.06.13
	итого	74		

Дата выдачи задания: 27.05.2013 г.

Руководитель: _____ / _____ /

Студент: _____ **Жуманазаров С.С.**

ВВЕДЕНИЕ

В основных направлениях экономического развития Республики Узбекистан предусмотрен подъем экономики страны, главным образом, за счет ускорения научно-технического прогресса и широкого внедрения энергосберегающих технологий. Поиск эффективных путей снижения энергоемкости разрушения горных пород является одним из главных направлений современных научных исследований в горной науке.

При выполнении поставленной задачи особое место отводится горнодобывающей промышленности. Ведущую роль в общем технологическом комплексе процессов горного производства занимают – взрывные работы.

Большой вклад в развитие теории разрушения и деформации горных пород взрывом внесли ученые Н.В.Мельников, В.В.Ржевский, Е.И.Шемякин, В.Е.Александров, Е.Г.Баранов, В.А.Боровиков, К.Е.Виницкий, О.Е.Власов, А.А.Вовк, Г.П.Демидюк, М.Ф.Друкованный, Э.И.Ефремов, Н.Ф.Кусов, Б.Н.Кутузов, Ф.И.Кучерявый, В.М.Комир, Д.М.Кушнарев, Л.Н.Марченко, Э.О.Миндели, П.С.Миронов, Г.И.Покровский, В.Р.Рахимов, Б.Р.Раимжонов, В.Н.Родионов, В.К.Рубцов, А.Ф.Суханов, В.Н.Сытенков, В.П.Тарасенко, Н.У.Турута, А.Н.Ханукаев и другие. В трудах этих ученых исследована физика процесса разрушения и установлены основные закономерности разрушения горных пород, а также влияние горно-технологических характеристик на эффективность ведения взрывных работ.

В работах В.В.Адушкина, Ф.А.Авдеева, Д.М.Кушнарёва, Г.И.Покровского, В.Н.Родионова, В.А.Цурика, В.К.Тулупова, А.А.Черниговского и других ученых исследовались вопросы действия удлиненных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) на выброс с целью повышения их эффективности на открытых работах.

Проведенные экспериментальные взрывные работы с целью установления эффективности применения траншейных зарядов ВВ

показывают, что при взрыве однорядными траншейными зарядами на выброс в выемки возвращаются 25-30%, а при двухрядном взрыве траншейных зарядов ВВ объем обратного упавшего грунта составляет 35-40%, а ширина выемок по дну, доходит до 25 м.

Исследованиями также установлено, что в условиях расположения грунтовых вод вблизи поверхности способ образования выемок с помощью траншейных зарядов выброса считается крайне неэффективным из-за вспучивания массива по оси выработки, образовавшегося вследствие относительно большой текучести грунта, который возвращается обратно после выброса, оползает по дну выемки и поднимается по инерции вверх по оси выработки.

При этом, для достижения положительного эффекта, повышалась энергонасыщенность взрываемого грунтового массива путем увеличения удельного расхода ВВ в 2-8 раза и применения водоустойчивого дорогостоящего ВВ.

Отсутствуют закономерности описывающая взаимосвязь дальности разлёта грунтового потока в зависимости от начальной скорости и времени бросания, а также коэффициента сопротивления воздуха. Также отсутствует зависимостей изменения максимального давления во фронте ударной волны от расстояния до места взрыва, масса заряда и изменения времени действия максимального давления во фронте ударной волны от удельного импульса в различных песчаных грунтах.

В связи с вышеизложенным нами определена основных параметров навала грунта на основе изучение законов газодинамики взрыва траншейных зарядов выброса для повышения их эффективности открытых горных работах, которая является актуальной научной задачей имеющие важное народнохозяйственное значение.

Работа проводилась в соответствии с тематическим планом государственной научно-технической программы ГКНТ Республики

Узбекистан 01.200010483 “Повышение эффективности образования выемок в грунтах взрывами на выброс с помощью траншейных зарядов взрывчатых веществ”.

Целью работы является определение основных параметров навала грунта на основе изучения динамики взрыва траншейных зарядов выброса для повышения их эффективности на открытых горных работах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. Анализ выполненных исследований образования навала выброшенного грунта взрывами траншейных зарядов выброса
2. Математическое моделирование действия траншейных зарядов выброса в грунтах
3. Теоретические исследования динамики взрывов обвалованного грунтом траншейных зарядов выброса

Основные методы исследования. Диссертационная работа выполнена с применением комплексного метода исследований, включающего обобщения и теоретические исследования дальности разлёта грунтового потока взрывами линейных зарядов выброса в различных грунтах с использованием физико-математического моделирования, изучение кинематики разлета грунтового потока для определения основных параметров навала выброшенного грунта, а также математической статистики корреляционного анализа полученных результатов.

Научные положения, представленные на защиту, полученные лично соискателем:

1. Под действием максимального давления во фронте ударной волны линейного заряда выброса в зависимости от расстояния до места взрыва и массы заряда, а также времени действия максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от удельного импульса давления различных песчаных грунтах на обе стороны удлиненной выемки образуются их навал.

2. Дальность образования навала выброшенного грунта зависит от дальности разлёта грунтового потока, начальная скорости, угол бросания грунтового потока, времени бросания и коэффициента сопротивления воздуха. Угол бросания грунтового потока находится в прямой зависимости от угла грунтовой обваловки линейных зарядов выброса.

3. Дальность бросания грунтового потока зависит от размеров грунтовой обваловки линейных зарядов выброса, угла откоса грунта и расстояния от оси выемки до точки пересечения поверхности грунтовой обваловки с горизонтом выемки линейных зарядов выброса.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны теоретические основы повышения эффективности образования выемок в грунтах с использованием траншейных зарядов выброса, научная новизна которых заключается в управлении направлением выброса за счет их обваловки грунтом, извлекаемом в контуре выемки, увеличивающей процент выброса;
- на основе использования законов газодинамики определены аналитические зависимости размеров грунтовой обваловки от угла естественного откоса, расстояния от расчетной оси выемки до линии пересечения ее боковой поверхности с горизонтальной плоскостью ее основания, обеспечивающих максимальный эффект выброса;

Научное значение и практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработаны теоретические основы определения размеров обваловки грунтом траншейных зарядов выброса в зависимости от угла естественного откоса грунтов и расстояния от расчетной оси выемки до линии пересечения ее боковой поверхности с горизонтальной плоскостью ее основания, при которой достигается максимальный эффект выброса;
- установлены зависимости дальности бросания грунтового потока при образовании выемок с учетом изменения угла направления разлета

движущегося от взрыва массы грунта за счет обваловки траншейных зарядов ВВ;

Результаты исследования используются в учебном процессе в Навоийском государственном горном институте при чтении дисциплины "Разрушение горных пород взрывом".

Структура и объем работы. Диссертационное исследование состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Содержание работы изложено на 81 страницах машинописного текста, включая 7 таблиц, 20 иллюстраций, 58 литературных источников.

1. АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ НАВАЛА ВЫБРОШЕННОГО ГРУНТА ВЗРЫВАМИ ТРАНШЕЙНЫХ ЗАРЯДОВ ВЫБРОСА

1.1. Анализ литературных данных об исследованиях развития взрывной полости и движения среды в сторону открытой поверхности массива

При описании действия зарядов ВВ на выброс основное внимание уделяется процессу развития взрывной полости и движения среды в сторону открытой поверхности грунтового массива, которая достаточно полно описана в работах [1-27].

На основании теоретических и экспериментальных исследований В.В.Адушкина, М.А.Садовского, В.Н.Родионова, Г.И.Покровского, М.М.Докучаева, А.Н.Ханукаева, Г.М.Ляхова, А.А.Черниговского и других ученых [1-5, 7, 17, 21-27] процесс выброса, с точки зрения механизма передачи энергии выбрасываемому грунту, схематично можно представить в виде, которая приведена на рис.1.1.

Под воздействием свободных продуктов взрыва формируется ударная волна, энергия которой равномерно передается во все стороны. Песчаный массив уплотняется и вокруг зарядной камеры образуется полость в виде правильной сферы радиусом, достигающим $10 R_0$ (где R_0 – радиус полости), что в несколько раз превышает радиус полости в твердых породах. В работах [2,7,8] эту первую стадию называют камуфлетной (грунт движется центрально-симметричным образом, как при взрыве в безграничной среде).

Время, необходимое для образования полости в песчаном массиве, составляет 200 мс на 1 м радиуса заряда [5], что в несколько десятков радиусов больше чем в твердых породах. Например, при линии наименьшего сопротивления (ЛНС) равной $50 R_0$ и при $R_0 = 0,053$ м длительность фазы сжатия составляет 60 мс, а время пробега волны до открытой поверхности 2-3 мс.

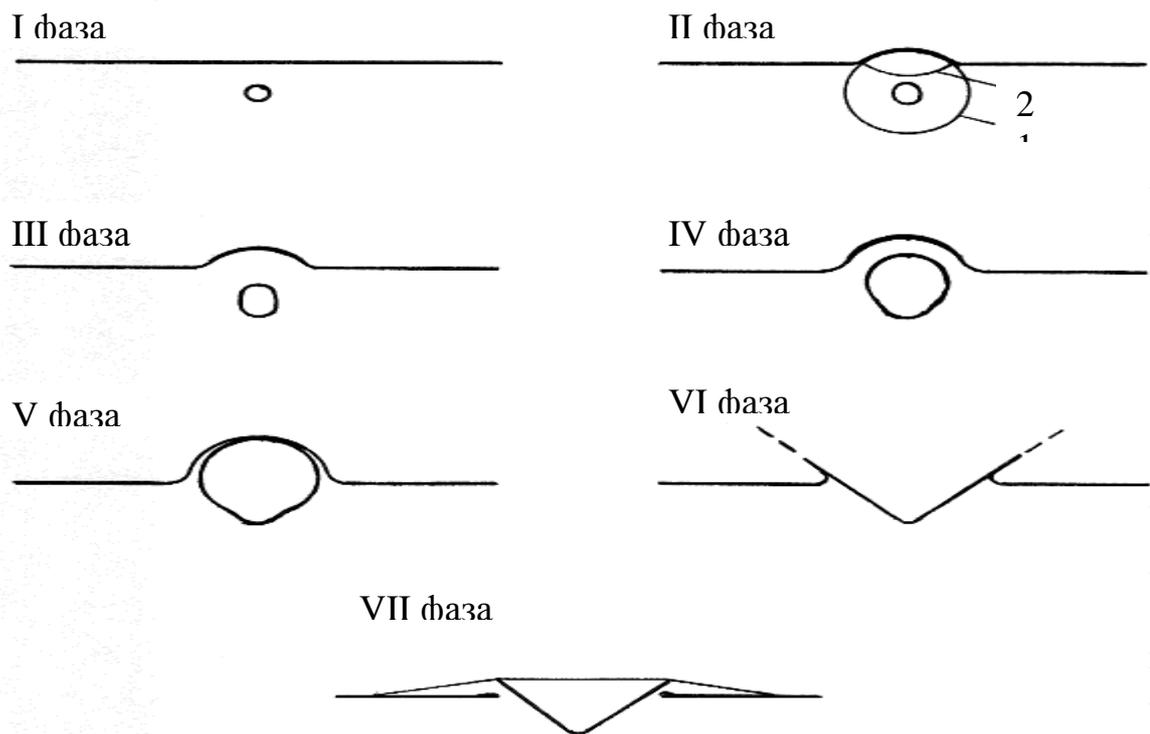


Рис.1.1. Схема процесса образования взрывной воронки в грунтах:

1-падающая (прямая) волна; 2-отраженная волна.

Поскольку длина волны в десятки раз превышает ЛНС, то отраженное поле смещений накладывается на поле смещений, образованное прямой волной. Скорость смещения по ЛНС удваивается. Таким образом, симметрия в поле смещения нарушается сразу, а не после отражения волны от открытой поверхности и полость начинает вытягиваться в направлении ЛНС (рис.1, фаза III); форма полости приближается к эллиптической, большая ось которой совпадает с ЛНС. Поскольку путь пробега волны по ЛНС является минимальным то скорость смещения и кинетическая энергия перемещающейся породы в этом направлении являются максимальными.

Поднятая масса оказывается в пределах оболочки, оконтуренной изнутри поверхностью полости, а снаружи – поверхностью параболоида вращения. Наибольшую толщину оболочка имеет в своей нижней части, где она ещё связана с массивом, наименьшим в верхней части.

Неравномерное размещение породы в различных частях оболочки и неодинаковая сопротивляемость её перемещению приводят к тому, что верхняя часть оболочки продолжает перемещаться с большой скоростью, тогда как её нижняя часть, обладая большей массой и будучи связана с массивом, перемещается с меньшей скоростью. Она быстро теряет свой начальный запас кинетической энергии. Таким образом, верхняя часть оболочки быстрее увеличивается в объеме по сравнению с нижней. В момент, близкий к концу процесса, толщина верхней части оболочки уменьшается настолько, что силы сцепления между частицами среды становятся незначительными. Подъем породы представляет собой полет отдельных кусков и частиц и верхняя часть оболочки полностью раскрывается, разлетаясь в виде несвязанной массы.

Таким образом, направленное действие грунтового массива по ЛНС обусловлено действием падающей и отраженной волны. Этот этап назван в работах [2,6] вторым этапом стадии – газового ускорения разлета породы в направлении ЛНС газообразными продуктами взрыва, находящимися в камуфлетной полости. С момента прорыва газа в атмосферу скорость полёта частиц грунта увеличивается. В момент достижения максимальной скорости полета количество энергии, передаваемое грунту волной и продуктами взрыва, составляет 95% потенциальной энергии заряда [6].

Основная масса поднятого грунта оказывается сосредоточенной в средней и нижней частях оболочки. Поскольку средняя часть оболочки обладает большей скоростью по сравнению с нижней, она отклоняется от оси воронки на большее расстояние. Масса оболочки, израсходовав весь свой запас кинетической энергии, опускается под тяжестью собственного веса, образуя открытую взрывную воронку. Так как основная масса грунта была сосредоточена в нижней части оболочки, то после её опускания у краев воронки образуется высокий гребень. В этот момент воронка имеет наибольший объем.

Порода, опустившаяся на край воронки, начинает сползать в нее до образования угла естественного откоса. Это приведет к уменьшению первоначальной глубины воронки и, в целом, к уменьшению её объема. Уменьшается и первоначальная высота гребня воронки (рис.1.1. фаза VII). Таким образом, направление действия грунтового массива по ЛНС обусловлено действием падающей и отраженной волны. После подхода отраженной волны к полости движущейся массы сообщается некоторое количество дополнительной энергии, оставшейся в продуктах взрыва. Этот этап назван в работах [2,6] стадией газового ускорения разлета породы. С момента прорыва газов в атмосферу скорость полета частиц грунта увеличивается. В момент достижения максимальной скорости полета количество энергии, передаваемое породе ударной волной и продуктами взрыва, составляет 95% потенциальной энергии заряда [2,6].

Затраты энергии заряда на деформации при взрыве двух нитей детонирующего шнура в песке естественной влажности, приведенные на рис.1.2, согласно работе [8], составляют

$$E_{\text{деп}} = E_{\text{вв}} - [E_{\text{кин}} + E_{\text{упр}} + \Delta E_{\text{ост}}], \quad (1.1)$$

где $E_{\text{кин}}$ и $E_{\text{упр}}$ – энергии, расходуемые на перемещение породы и упругие деформации (определяется экспериментально).

Остаточная энергия продуктов взрыва:

$$\Delta E_{\text{ост}} = (V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}}) P_{\text{ост}} / P - 1, \quad (1.2)$$

где P - показатель адиабаты равный 1,4.

Согласно работе [8], из рис.1.2. видно, что остаточная энергия продуктов взрыва в начале процесса составляет 25%, а кинетическая энергия движущейся массы-75% от потенциальной энергии заряда (на расстоянии $10 A_0$ от центра взрыва). Энергия, оставшаяся в продуктах взрыва ($E_{\text{ост}}$), и энергия упругих деформаций ($E_{\text{упр}}$) в конце процесса составляют всего

несколько процентов общей энергии, переданной грунту. Оба превышают 80%.

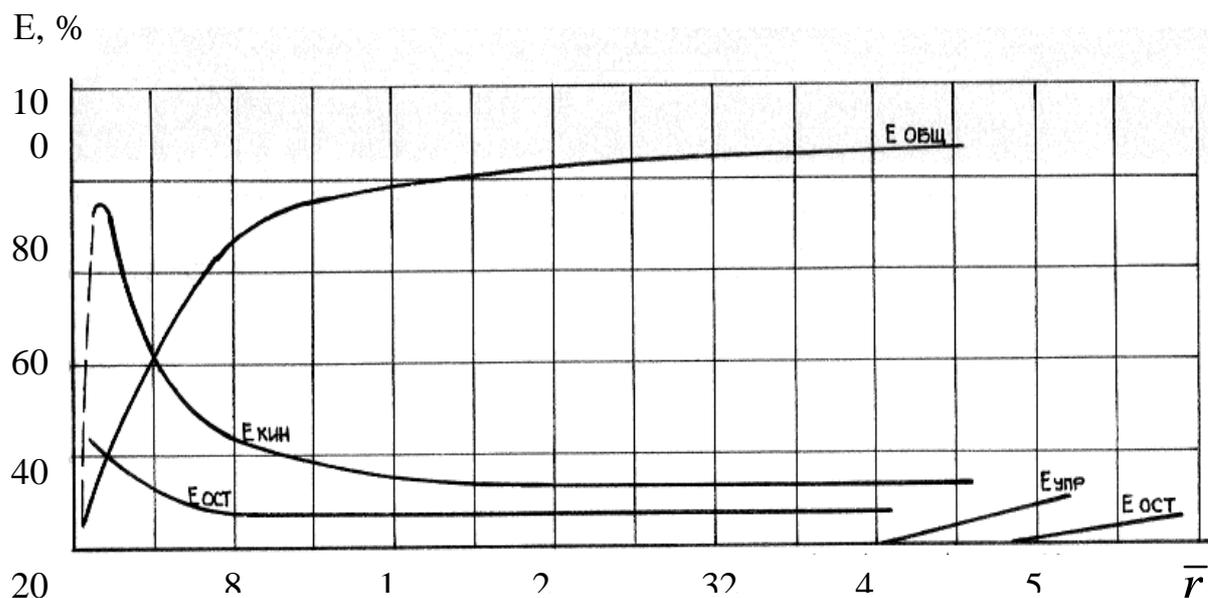


Рис.1.2. Зависимость затрат энергии при взрывании двух нитей детонирующего шнура во влажном песке.

По экспериментальным данным радиус газовой полости при взрывах в песчаных грунтах [9-11] определяется по формуле:

$$R_k = k \sqrt[3]{Q}, \text{ м} \quad (1.3)$$

где Q - масса заряда ВВ в тротиловом эквиваленте, кг;

k - коэффициент, зависящий от физических параметров грунтов, значения которых приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Значения физических параметров грунтов

Наименование грунта	Плотность, ρ , кг/м ³	Скорость продольных волн, c_p , м/с	Параметр, k , м/г ^{1/3} [Прочность МПа]	Акустическая жесткость, $\rho c_p^2 / 10^9$, Па
Песок с влажностью 0...20%	1200...1900	54...1000	- , [-]	-
Песчаный: влаж. 3...6%	1450...1550	80	4...7	-

влаж. 10-12%		180		
Водонасыщенный	–	–	6...7,[-]	–
Песок	1600	2300	–	0,29
Песчаный	1400...2000	300...1300	–,[30]	0,13...3,4
Песчаный	–	200	–,[-]	–
Глинистый	1400...2500	800...3300	–,[30]	0,9...8,2
Глина	–	700	–,[-]	–
Глина, влаж. 25%	1900...2050	–	3,9,[-]	–
Суглинистый грунт	–	220	3...5,[-]	–
Лессовый грунт	–	260	–,[8...12]	0,24...0,4
Лесс и глина	–	–	3,9	–
Лесс влаж. 9,5%	1580	–	3,9,[-]	–

Радиус газовой полости согласно [12] определяется по выражению:

$$R_{\kappa} = R_{\text{э}} \sqrt{r \cdot \Pi_{\phi}^{\alpha}}, \text{ м} \quad (1.4)$$

где Π_{ϕ} – показатель простреливаемости, $\text{дм}^3/\text{кг}$;

α - коэффициент, учитывающий свойство ВВ:

$$a = \sqrt{\frac{Qr}{Q_0 r_0}}, \quad (1.5)$$

где Q, ρ - теплота взрыва и плотность применяемого ВВ;

Q_0, ρ_0 – соответственно для аммонита БЖВ;

$R_{\text{э}}$ – эквивалентный радиус заряда ВВ:

$$R_{\text{э}} = \frac{dh}{2(d+h)}, \text{ м} \quad (1.6)$$

где d - диаметр щели, м;

h - высота заряда, м.

Значения показателя простреливаемости грунтов, по данным ЦПЭС треста “Союзвзрывпром” приведена в табл. 1.2 [13].

Значения показателя простреливаемости [13]

Горная порода	Классификация грунтов и пород по СНиПу	Пределы показателя простреливаемости
Глина пластичная моренная	II	900...1400
Глина черная	III	400...600
Глина моренная	III	220...530
Глина желто-бурая жирная	III	220...270
Глина темно-красная жирная	III	170...250
Мергель мягкий трещиноватый	IV	100...170
Мергель мягкий сильно трещиноватый	IV	180...280
Глина ломовая темно-синяя	IV	100...150
Суглинок тяжелый, глина песчанистая	IV	70...190
Мел мягкий, известняк ракушечник	V	35...65
Мергель средней крепости, доломит мергlistый, известняк мелкий сильно трещиноватый	V-VI	около 20

При рассмотрении камуфлетной фазы взрыва также определяется форма газовой полости, зависящая от способности грунта деформироваться в различных направлениях. При расчете начальных скоростей отбрасываемого грунтового потока в фазе газового ускорения используются лучевые приближения, основанные на экспериментальных результатах [14-17].

Вектор скорости грунтового потока во всех случаях направлен по нормали к границе газовой полости [18-29]. Вследствии этого, по данным [24-26, 28] при однорядном взрыве траншейными зарядами ВВ на выброс в выемку возвращается до 25-30% грунта, а при двухрядном взрыве траншейными зарядами ВВ объем обратно упавшего грунта составляет 35-40%.

Полученные зависимости авторов работ [19-23, 25] также показывают, что величина кинетической энергии пропорциональна энергии взрыва. При разлете грунта, являющимся в сущности при плоском движении компактно

движущейся массой, в соответствии с монографией [23], в благоприятных условиях сопротивление воздуха можно не учитывать.

Согласно работам [19-21] траектории частиц определяются интегрированием уравнений движения в поле силы тяжести. По мере падения частиц грунта профиль развала, образованной взрывами на выброс, корректируется по [20].

В работах [5, 31-33] приведены кинограммы процесса образования взрывной воронки в грунтах. В работе [5] отмечается, что продукты взрыва отрываются от поверхности массива в первые же миллисекунды. Порода продолжает перемещаться без участия по инерции. При взрыве накладного заряда стадия газового ускорения разлёта породы отсутствует. Это четко видно в процессе разрушения песчаной модели равной 5,94 мс; 13,2 мс и 20,13 мс при равномерном взрывании зарядов в различные моменты после взрыва (рис.1.3.)

В работе [31] приведены результаты поведения газовой полости и среды в зоне воронки взрыва. Установлены три области, отличающиеся характером движения.

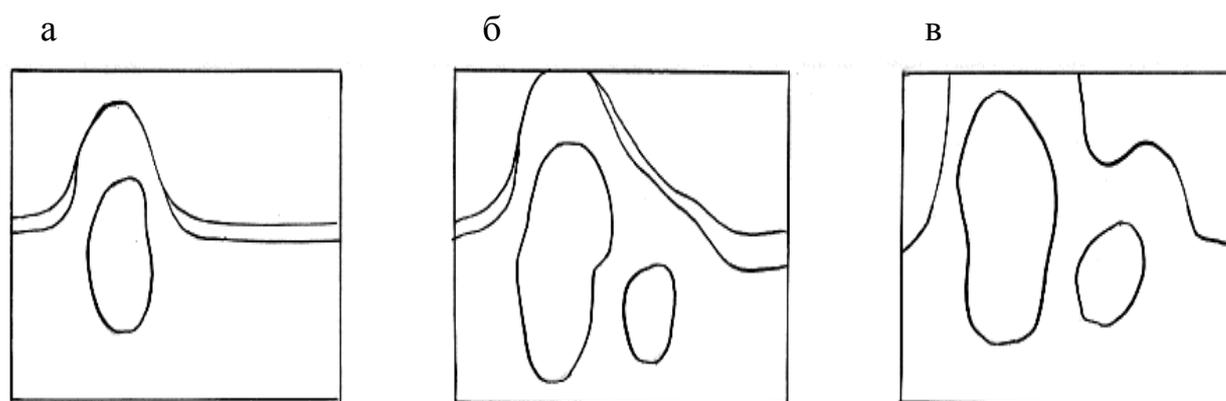


Рис. 1.3. Процесс разрушения песчаной модели при равномерном взрывании зарядов в различные моменты после взрыва [30]:

а) спустя 5,94 мс;

б) спустя 13,2 мс;

в) спустя 20,13 мс

На рис.1.4 показаны контуры полости, купола и траектория отдельных точек среды, на которых четко видна первая область, расположенная под зарядом в зоне, ограниченной углом примерно 60° от оси симметрии. Движение среды здесь направлено по радиусу, исходящим под зарядом ВВ. После остановки репера прослеживается его возвратное движение к центру взрыва. Во второй области движение среды существенно двумерное. Четко прослеживается возвратное движение в направлении к оси воронки. Отношение между вертикальной и горизонтальной компонентами смещений среды зависит от глубины залегания данной точки. Чем ближе к открытой поверхности, тем больше вертикальные компоненты. Очевидно, что точки, имеющие направленность движения по оси воронки, не будут выброшены из ее контуров. Третья область, расположенная над местом взрыва, отличается практически прямолинейным движением среды. Это собственно область выброса.

На рис.1.5 приведены изменения размеров газовой полости во времени. Исследованиями [31] также установлены, что при взрыве на выброс во влажном песке обнаружено нарушение сплошности в виде систем трещин в объеме, существенно превышающем объем воронки взрыва. Следует отметить, что зона, охваченная трещинами, в 3-4 раза превышает объем воронки выброса.

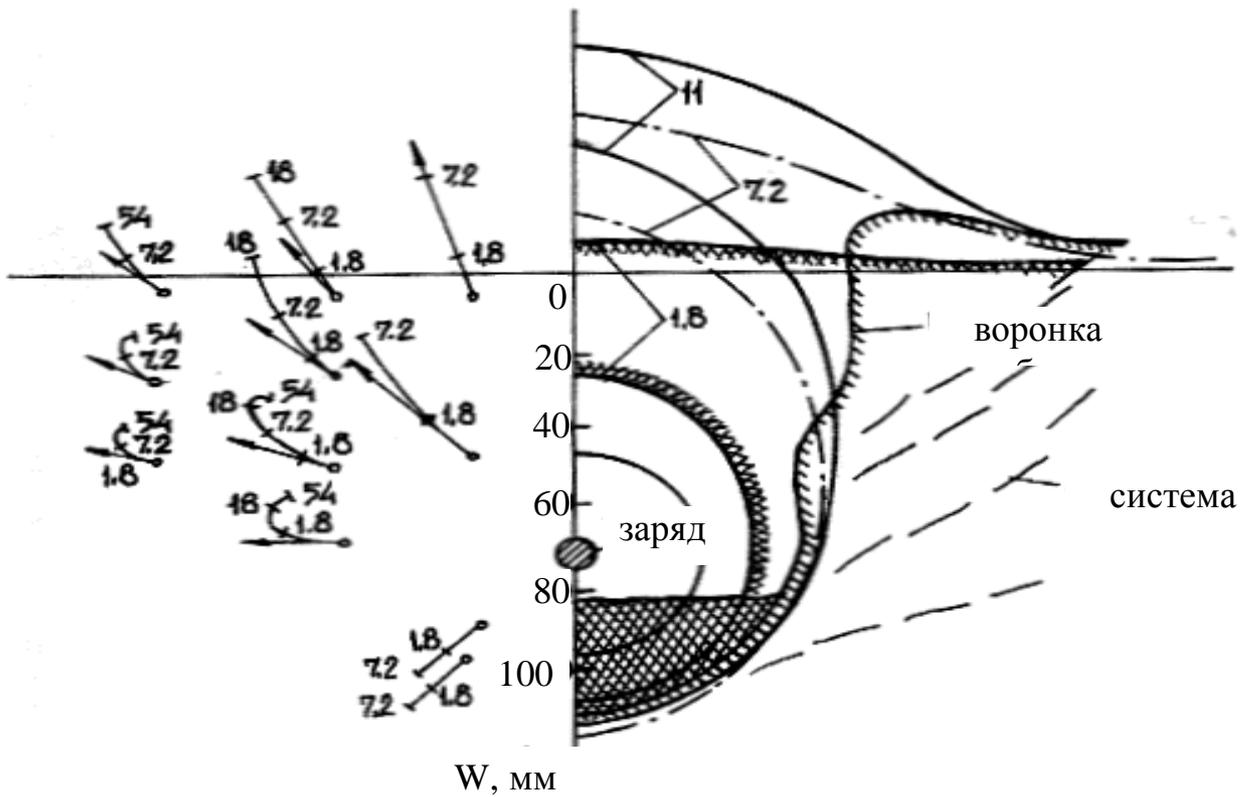


Рис.1.4. Контуры полости, купола и траектория отдельных точек среды. (цифрами указано время в миллисекундах)

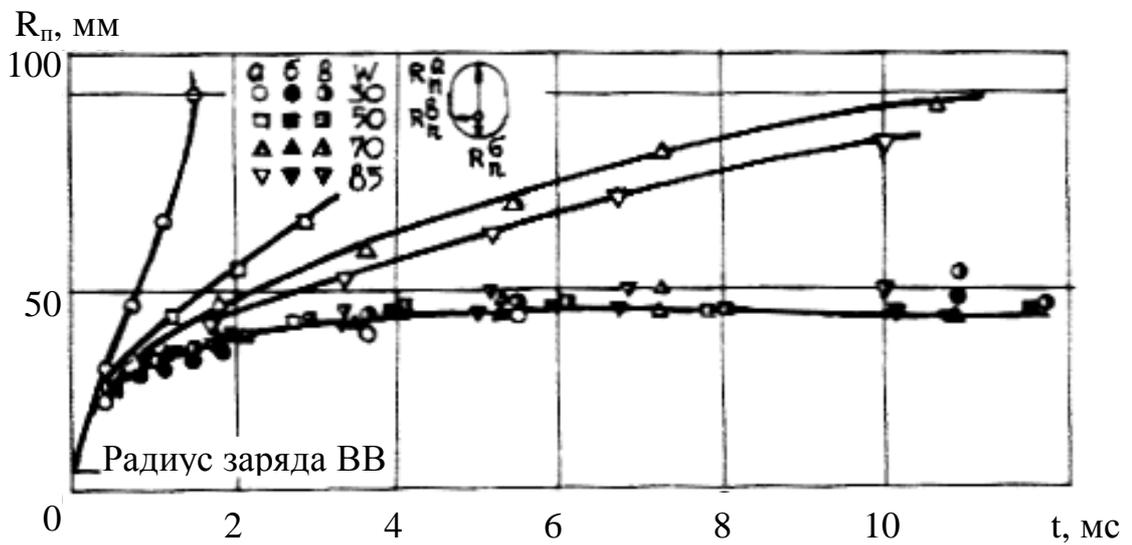


Рис.1.5. Изменения размеров полости во времени.

В работе [32] на моделирующем устройстве был исследован эффект взрыва на выброс одного заряда. Исследованиями установлено, что в средней части холма образовалась воронка с пологими бортами. Киносъемка показала, что в процессе развития взрыва на месте вершины холма образуется шарообразный купол. Это связано с тем, что две линии ЛНС заряда практически совпадают с расстоянием до вершины холма. При условии выброса у заряда можно уменьшить линейную плотность заряжения либо расположить несколько глубже (с ЛНС равной 28-30м), увеличив тем самым объем сброса. Автором приведены результаты применения жидкостных измерителей скорости при наблюдениях за движением открытой поверхности при взрывах на выброс и сброс.[33]

С помощью приборов жидкостных измерителей скорости стало возможным измерение кинематических параметров в условиях сложного рельефа и воронки при взрывах на склонах. Кроме того, эпюры $V(t)$ можно использовать для изучения динамических процессов, протекающих при взрывах на выброс.

1.2. Анализ литературных данных по определению параметров навала выброшенных грунтов взрывами траншейных зарядов выброса

В настоящее время накоплен большой практический опыт применения в мягких скальных породах взрывов траншейных выброса при сооружении выемок [34, 35, 37-44]. Выполненные исследования в работе [35] позволили установить основные параметры навала выброшенного грунта в зависимости от удельного расхода ВВ и влажности взрываемого грунта. Взрываемые грунты были представлены суглинками, глинами, речными наносами различной степени влажности и относились к II-III группе по СНиПу.

Большая серия экспериментов проводилась в работах [35, 38-44], где исследовалось влияние влажности взрываемого грунта на основных

параметров навала грунта, образованного при взрыве траншейных зарядов ВВ на выброс.

Выполненные наблюдения при сооружении выемок-каналов с помощью траншейных зарядов спрямляющих русло на р.Терек [35] позволили установить эффективность использования траншейных зарядов с большими показателями действия взрыва, а также оценить возможность применения траншейных зарядов для направленного выброса в обводненных условиях.

В работе [35] авторами проводились экспериментальные взрывные работы с целью установления эффективности применения двухрядного расположения траншейных зарядов с большим показателем действия взрыва ($n > 4$). Взрываемые грунты были представлены суглинками, глинами, наносами различной степени влажности и относились к II-III группе по СНиПу.

Фактическая величина ЛНС изменялась от 2,6 до 2,8 м и составляла в среднем 2,7 м. Уровень воды в траншее при заряджении не превышал 0,5-0,6 м. Расстояние между траншеями составляло 6 м. Общий расход взрывчатого вещества составлял 92000 кг.

В результате выполненного взрыва объем выброшенной породы составило 22500 м³. Фактическая величина удельного расхода ВВ была явно завышенной 4,1 кг/м³, что привело к удорожанию работ.

В следующей серии взрывов зарядные траншеи были пройдены на расстоянии 7 м друг от друга, а ЛНС составила 2,6-2,7 м. Высота слоя воды в траншеях составила 0,1-0,2 м. Общий расход ВВ составил 138720 кг.

Объем породы, выброшенной в результате взрыва, оказался равным 40800 м³ при удельном расходе ВВ 3,4 кг/м³.

Результаты взрыва траншейных зарядов ВВ представлены на рис.1.6., которые показывают, что высота навала грунта, образовавшегося на бортах

выемок составила 1,3-1,5 м, а длина сплошного навала грунта мощностью от 0,1 м до 0,2 м составила 150 м.

По дну выемки зафиксирована перемычка между зарядами. Высота перемычек составила 1,2 м; ширина – 4 м.

В результате опытно-экспериментальных взрывов траншейных зарядов ВВ, расположенных в два ряда, установлена зависимость удельного расхода ВВ от показателя действия взрыва, которая приведена на рис.1.7.

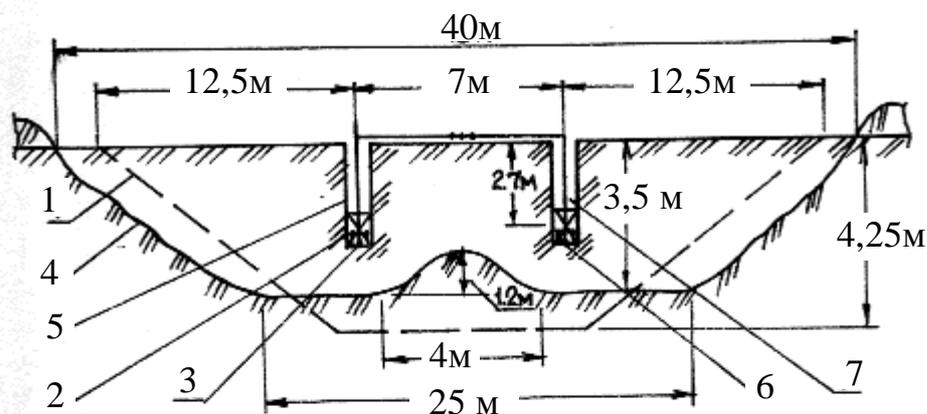


СХЕМА ВЗРЫВНОЙ СЕТИ

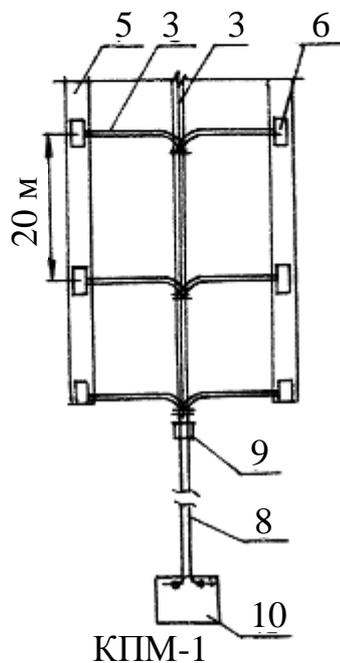


Рис.1.6. Схема расположения и результаты взрыва траншейных зарядов выброса:

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1-проектный контур выемки; | 2-траншейный заряд выброса; |
| 3-расчетная глубина выемки; | 4-контур выемки после взрыва на выброс; |
| 5-зарядные траншеи; | 6-промежуточные детонаторы; |
| 7-забойка; | 8-магистральный провод; |
| 9-электродетонатор; | 10-минная станция. |

Как следует из этого графика, для получения большой ширины сечения выемки, т.е. при увеличении показателя действия взрыва траншейных зарядов на выброс с 7,0 до 9,1 удельный расход ВВ нужно увеличивать от 3,17 до 8,7 кг/м³, т.е. почти в три раза [35].

Анализ проведенных исследований влияния влажности песка на геометрические размеры выемок, образованных взрывом линейно-протяженного заряда выброса, расположенной на разной глубине [38], показывает, что в исследуемом диапазоне влажности и глубины заложения заряда наблюдаются следующие закономерности:

- с ростом относительной глубины заложения заряда ВВ глубина, ширина и поперечное сечение выемки изменяются;

- с увеличением массовой влажности от 3,7 до 13,6 % уменьшается оптимальная глубина заложения заряда, при сечении образованных выемок, остающимися практически без изменения. Эти исследования проводились в различных грунтах при образовании сечения выемок с применением траншейных зарядов выброса без обваловки их грунтом.

В работе [42] авторами приведены результаты внедрения взрывов на строительстве мелиоративных каналов в сложных гидрогеологических условиях Астраханской области.

Опытно-промышленные работы по внедрению рекомендаций, учитывающих влияния расположения грунтовых вод на параметры заложения заряда и поперечные сечения канала, проводились на участках трассы строительства канала 2-МК на ПК-ПК 78+86. Глубина залегания

уровня грунтовых вод на этом участке составила 9 м и была на 0,5 м выше проектной глубины канала.

В результате взрыва на выброс образовался участок канала с деформированными откосами, поперечные сечения которых приведены на рис.1.8.

Прорыв грунтовых вод на дне канала наблюдался в течение 1,5 часа. При этом происходили деформация и оползание откосов. Фактический удельный расход ВВ составил 4,8 кг/м³.

**Рис.1.7. Зависимость удельного расхода ВВ
от показателя действия взрыва.**

Опытно-промышленные работы проводились также на участках каналов 1-МК, 2-МК на ПК 89+65 и Харацугинского МК на ПК 16+60 м, которые приведены на рис.1.9 (а,б).

Траншейный заряд ВВ располагался выше уровня грунтовых вод на расстоянии 0,5 м. Удельный расход ВВ составил 3,2 кг/м³. В результате взрыва образовался участок с устойчивым профилем, практически совпадающим с проектным.

В работе [43] автором приведены методика и результаты исследования в области влияния взрыва линейно-протяженного заряда выброса, выполненного в органо-минеральных, среднелитифицированных глинистых грунтах, характер пространственных изменений несущей способности грунтов в зоне действия энергии взрыва.

Наиболее интенсивные нарушения структурной прочности массива связаны с присутствием уровня грунтовых вод на открытой поверхности.

Отмеченный факт имеет важное технологическое значение. Специфика строения деформированной взрывом зоны в слабых грунтах позволяет физически-обоснованно подойти к разработке мероприятий по ликвидации побочных неблагоприятных явлений, выражающихся во вспучивании

разрушенного грунта в образованной взрывом выемки и оплывании ее бортов.

1.3. Обзор и анализ разработанных методик инженерных расчета основных параметров траншейных зарядов выброса.

К настоящему времени разработано несколько методик для расчета зарядов выброса [35, 69-80]. В этих методиках предлагается вычислить массу ВВ на один погонный метр линейных зарядов выброса, расстояние между рядами зарядов, величины размеров выемок и основных параметров навала грунта, образованных взрывами на выброс в зависимости от свойств ВВ и грунтов, глубины заложения заряда ВВ, показателя действия взрыва.

Формула для расчета массы линейных зарядов выброса, разработанная профессором М.М.Боресковым [35, 76, 78], имеет вид:

$$Q = \frac{2K_6 W^2 (0,4 + 0,6n^3)}{n + 1} l_{зар}, \text{ кг}, \quad (1.8)$$

где Q- масса заряда ВВ на 1 м траншеи, кг;

K_6 - расчетный удельный расход ВВ, кг/м³;

$l_{зар}$ - длина заряда ВВ, м;

W- линия наименьшего сопротивления, м;

n- показатель действия взрыва:

$$n = \frac{r}{W}, \quad (1.9)$$

где r- радиус воронки выброса, м.

При величинах ЛНС свыше 25 м линейный заряд выброса [35, 77] рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{2K_6 W^2 B (0,4 + 0,6n^3)}{n + 1} l_{зар}, \text{ кг}, \quad (1.10)$$

где B - поправочный коэффициент на глубину приведен в работе [77].

Другая известная формула из Технических правил Гидроспецстроя, приведенная в работе [78], принимает вид:

$$Q = KW^2 0,6 \frac{n^2 + 1}{1 - 0,1n}, \text{ кг} . \quad (1.11)$$

Известна также формула для расчета массы зарядов выброса, предложенная профессором Г.И.Покровским [73-75]:

$$Q = KW^2 \frac{1}{n} \left(\frac{n^2 + 1}{2} \right)^2, \text{ кг} . \quad (1.12)$$

Анализ рассмотренных формул (1.8), (1.11), (1.12) показывает, что масса линейных зарядов выброса зависит в основном от глубины заложения заряда и показателя действия взрыва. На рис.1.15. приведены зависимости массы линейного заряда выброса от ЛНС при постоянном удельном расходе ВВ равном 3,5 кг/м³ и показателя действия взрыва на выброс равной 8, определенной по формулам М.М.Борескова, Г.И.Покровского и Технических правил Гидроспецстроя.

Полученные зависимости показывают, что при постоянном удельном расходе 3,5 кг/м³ и показателе действия взрыва равной 8, ЛНС равной 2,5 м массы линейных зарядов выброса на 1 м длины, определенные по формулам М.М.Борескова, Г.И.Покровского и из Технических правил Гидроспецстроя составляют соответственно 1495 кг; 2887 кг; 4267 кг. При этом фактические удельные расходы ВВ соответственно - 10,2 кг/м³; 19,6 кг/м³ и 29 кг/м³.

Проведенный анализ (рис.1.15.) показывает, что метод действия траншейного заряда ВВ на выброс с большими показателями действия взрыва ($n \geq 8$) по существующей технологии дает существенно разные результаты, а потому мало приемлем.

Для достижения положительного эффекта повышалась энергонасыщенность взрываемого массива путем повышения удельного расхода ВВ в 2-8 раза и применялось дорогостоящее водостойчивое ВВ. Абсолютное значение массы линейных зарядов выброса в грунтах,

определенное формулами М.М.Борескова, Г.И.Покровского и из Технических правил Гидроспецстроя, приведено в таблице 1.3.

Расстояние между рядами траншейных зарядов выброса при $n \leq 3,5$ вычисляют, согласно [35, 76-78], по формуле:

$$a_3 = 0,5W(n+1), \text{ м}, \quad (1.13)$$

где a_3 – расстояние между рядами траншейных зарядов, м.

Для значений $n=3,5-8,0$ расстояние между рядами траншейных зарядов на выброс следует определять по формуле, приведенной в работах [35, 77]:

$$a_3 = W \frac{n+1}{0,4n+0,6}, \text{ м}. \quad (1.14)$$

Авторами в работе [79], для расчета расстояния между рядами траншейных зарядов выброса, была предложена формула:

$$a_3 = 1,57R_n k_{гг}, \text{ м}, \quad (1.15)$$

где R_n – максимальный размер газовой полости, м; определяется по формуле 1.3. согласно работ [9-12].

$k_{гг}$ – поправочный коэффициент, учитывающий глубину заложения заряда; при $n=2,5-3,0$, соответственно $k_{гг}=0,87-0,90$.

Для расстояния между рядами траншейных зарядов выброса авторами [79] была предложена формула:

$$a_3 = 2,3nW - 4,25H, \text{ м}, \quad (1.16)$$

где H – глубина выемки, в м.

Расстояние между рядами траншейных зарядов выброса вычисляют согласно [71, 72] по формуле:

$$a_3 = W \sqrt{0,4 - 0,6n^3}, \text{ м}. \quad (1.17)$$

Выполненный обобщенный анализ показал, что расстояния между рядами траншейных зарядов выброса, определяемые по формулам (1.13), (1.15)-(1.17), зависят от ЛНС и показателя действия взрыва при $n \leq 8$. Расстояние между рядами траншейных зарядов выброса дает завышенные

данные, которые составляют 11-18 м. Согласно работе [35] промышленными взрывами определены оптимальные расстояния между рядами траншейных зарядов выброса, которые были пройдены на расстоянии 7 м друг от друга. Относительное уменьшение расстояния между рядами траншейных зарядов выброса, в случае использования формулы 1.14., объясняется тем, что с увеличением показателя действия взрыва и массы заряда при постоянной величине ЛНС возрастает интенсивность прорыва слоя забойки, высота которого соответственно резко уменьшается при значениях $n > 3,5$ газами взрыва и снижением вследствие этого полезно совершаемой ими работы [35].

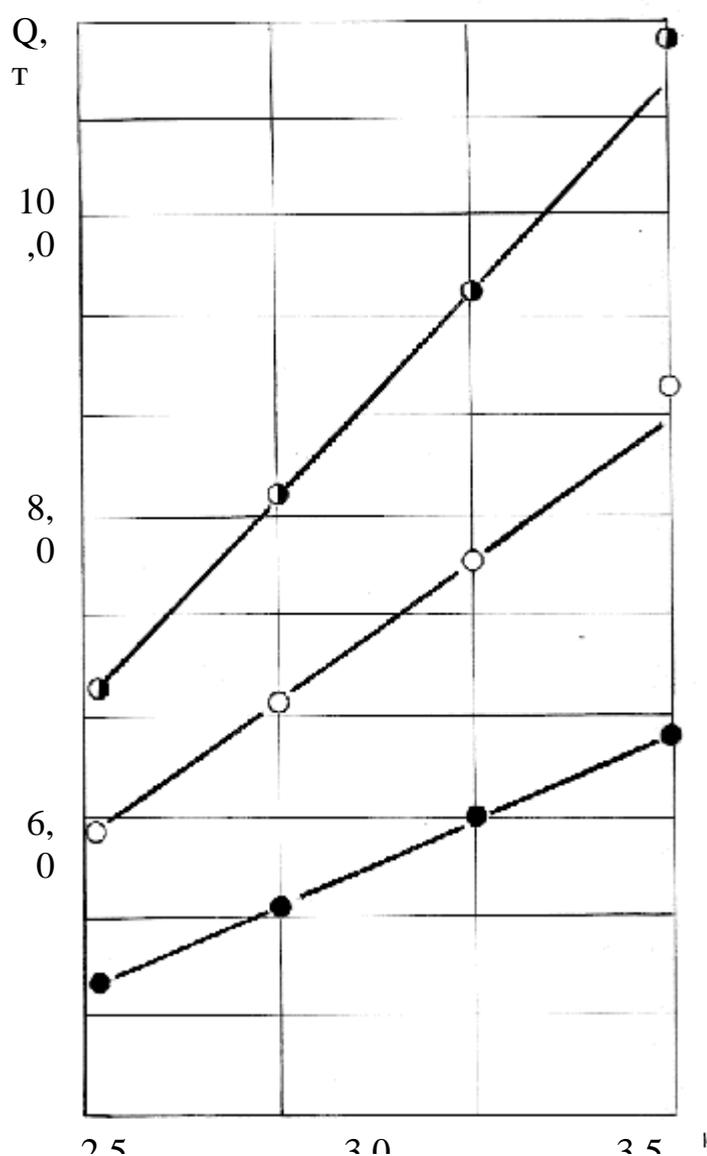


Рис.1.15. Зависимость массы линейного заряда выброса от ЛНС, определенная по формулам:

- - М.М.Борескова;
- - Г.И.Покровского;
- - Технических правил Гидроспецстроя

При расположении траншейных зарядов в два и более рядов для получения выемок с ровными стенками и дном величина показателя действия взрыва не должна превышать 6 [65].

При проектировании массовых взрывов на выброс, широко используемых для образования различных открытых горных выработок, а также при строительстве профильных сооружений, решающее значение обычно имеет правильный расчет элементов воронки выброса и основных параметров выброшенной горной массы.

Наибольшее распространение при проектировании взрывов на выброс получила формула для определения длины развала, которая приведена в работе [77, 78]:

$$L=5nW, \text{ м} \quad (1.18)$$

где L- длина развала, м.

Согласно формуле 1.18 длина развала зависит только от значения показателя действия взрыва и ЛНС.

Известно [35, 81-87] , что ЛНС и показатель действия взрыва при проектировании принимают в основном, исходя из требуемых геометрических размеров выемок, необходимого процента выброса, допустимых сроков производства работ. Между тем накопленный практический опыт [85] свидетельствует о том, что без учета свойств разрушаемой среды невозможно достаточно точно определить ни дробящей способности применяемых ВВ, ни основных параметров взрывных работ (в том числе элементов воронки выброса и параметров развала).

Авторами работ [84, 85] рекомендовано использовать при расчетах новый показатель – среднюю длину развала и учитывать дисперсию ее

значений. Такой подход позволит повысить надежность проектных расчетов при взрывании на выброс. Схема к определению характера распределения объема выброшенной породы приведена на рис.1.16.

Таблица 1.3.

Расчет массы линейных зарядов выброса в грунтах, определенный формулами расчетов различных авторов

Формула расчета линейных зарядов выброса в грунтах	Линия наименьшего сопротивления – W , м.			
	2,5	3,0	3,5	4,0
Объем выброса, м ³ /м	147	177	208	241
проф. М.М.Борескова $Q = \frac{2K_6 W^2 (0,4 + 0,6n^3)}{n + 1} l_{зар}, \quad \text{кг}$	<u>1495</u> 10,2	<u>2153</u> 12,2	<u>2931</u> 14,1	<u>3828</u> 16,0
проф. Г.И.Покровского $Q = KW^2 \frac{1}{n} \left(\frac{n^2 + 1}{2} \right)^2, \quad \text{кг}$	<u>2887</u> 19,6	<u>4158</u> 23,5	<u>5660</u> 26,2	<u>7392</u> 30,7
Гидроспецстроя $Q = KW^2 0,6 \frac{n^2 + 1}{1 - 0,1n}, \quad \text{кг}$	<u>4267</u> 29,0	<u>6143</u> 34,7	<u>8361</u> 40,2	<u>10920</u> 45,3

Примечание: $\frac{1495}{10,2}$ -масса заряда ВВ на 1 м траншеи, кг
-удельный расход ВВ, кг/м³

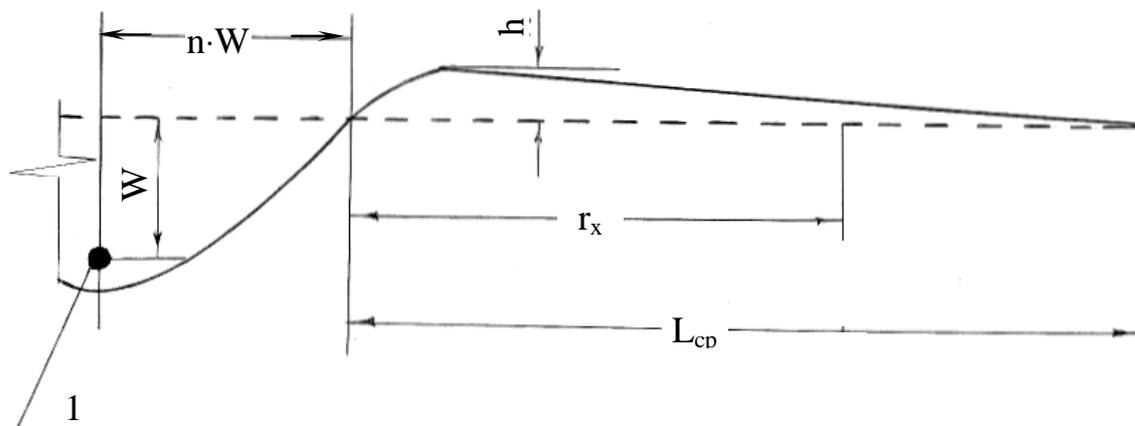


Рис.1.16. Схема определения характера распределения объема выброшенной породы, по данным [77,78]: 1- заряд ВВ.

При использовании траншейных зарядов выброса для расчета средней длины развала следует использовать формулу:

$$L_{cp} = 8W\sqrt{q \cdot n}, \text{ м.} \quad (1.19)$$

При проектировании основных параметров развала выброшенной породы часто возникает необходимость определения доли объемов пород, находящихся на различном расстоянии от зарядов. Согласно работ [35, 82, 84, 86] может быть использована следующая формула:

$$V_x = \left[1 - \left(\frac{L_{cp} - nW - r_x}{L_{cp} - nW} \right)^2 \right], \text{ м}^3 \quad (1.20)$$

где r_x - расстояние, на котором определяется доля выброшенной массы грунта, м.

Следующим основным параметром развала выброшенной горной массы является максимальная высота развала. При проектировании массовых взрывов на выброс для расчета максимальной высоты развала используют следующие формулы, которые приведены в работах [77, 78]:

$$h = 0,35P, \text{ м} \quad (1.21)$$

$$h = \frac{0,7W}{n}, \text{ м} \quad (1.22)$$

где h - максимальная высота развала грунта, м;

P - видимая глубина воронки выброса, м.

Приведенные формулы (1.21) и (1.22) не учитывают свойств взрываваемой среды, и в связи с этим фактические величины максимальной высоты развала значительно отличаются от проектных.

При использовании траншейных зарядов выброса максимальная высота развала грунта, образуемая на бортах выемки, может быть определена по формуле, которая приведена в работе [35]:

$$h = 0,15 + 0,9 \frac{P}{q}, \text{ м.} \quad (1.23)$$

При проектировании каналов особое значение имеет точное значение элементов воронки выброса, определяющих объемы полезного выброса из пределов проектного контура.

К основным элементам воронки выброса, которые приведены на рис.1.17., относится видимая глубина – P , ширина воронки по верху – B , ширина выемки на глубине равной ЛНС – B_w .

Исследованиями [77] установлено, что при $n=1\div 2$ видимую глубину воронки рекомендуется определять по формуле:

в песках:

$$P=0,33W(2n-1), \text{ м,} \quad (1.24)$$

в глинистых и суглинистых грунтах:

$$P=0,45W(2n-1), \text{ м.} \quad (1.25)$$

В результате опытно-промышленных взрывов на выброс, проведенных трестом “Союзвзрывпром”, рекомендована следующая формула для

определения видимой глубины воронки взрыва, которая приведена в работе [35, 77]:

$$P = K_1 W(2n-1), \text{ м}, \quad (1.26)$$

где K_1 - коэффициент, учитывающий горнотехнические условия ведения горных работ.

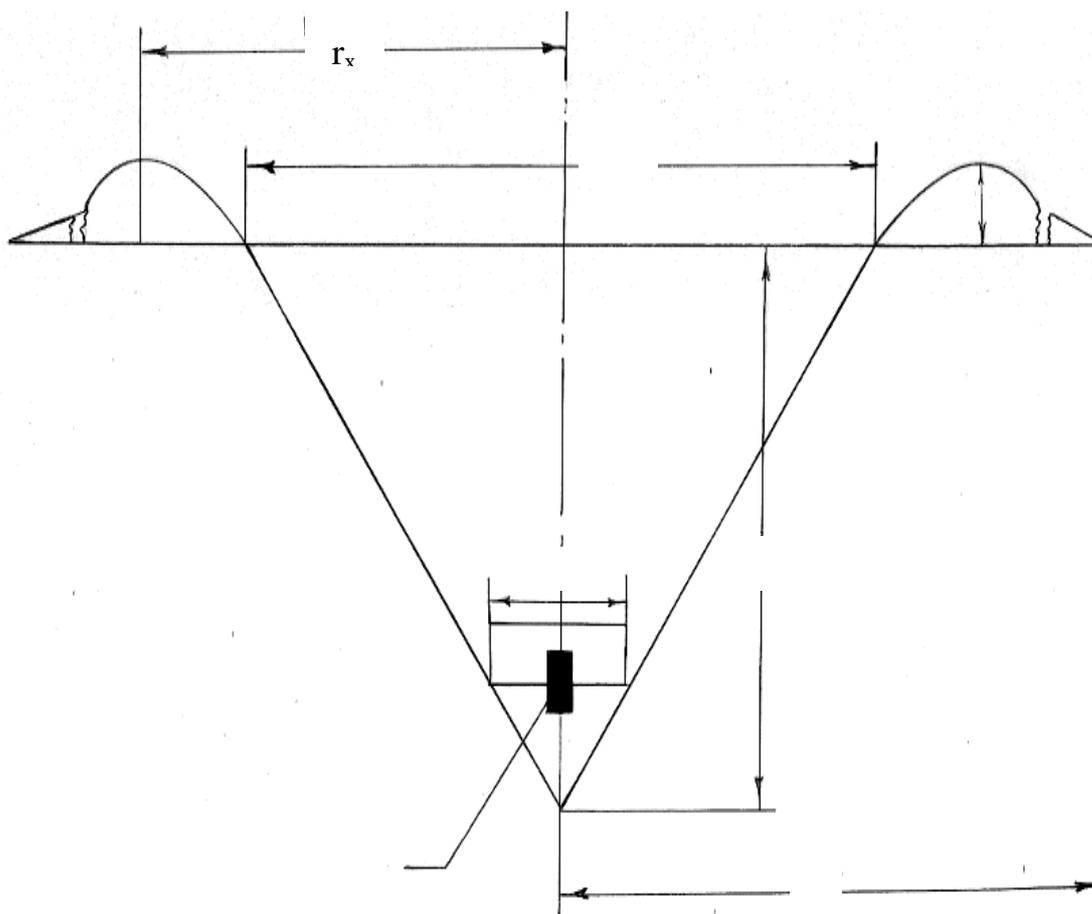


Рис.1.17. Основные элементы воронки выброса. 1- заряд ВВ.

Исследователями в работе [35] установлено, что при взрывании траншейных зарядов выброса значение K_1 следует уменьшать на 20-40 % по сравнению с использованием сосредоточенных зарядов ВВ. Минимальное значение K_1 необходимо принимать для зарядов с $n > 5$.

Для расчетов ширины воронки выброса в нескальных породах могут быть использованы формулы, разработанные трестом “Союзвзрывпром” и приведенные в работе [77]:

$$B_W=(1,7\div 2,2)W, \text{ м} . \quad (1.27)$$

Таким образом, в результате анализа установлено, что достоверные рекомендации по определению основных параметров воронки выброса отсутствуют при показателе действия взрыва $n > 2$. Исследованиями также установлено, что разработанные авторами расчетные формулы не учитывают физико-механических свойств взрываемого грунтового массива, количества траншейных зарядов ВВ и их глубины заложения, а также конструкции траншейных зарядов ВВ.

В результате выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что по классической схеме взрыва траншейных зарядов выброса, под действием газообразных продуктов детонации взрыва формируется камуфлетная полость, энергия которой равномерно передается во все стороны массива. Неравномерное размещение грунта в различных частях камуфлетной полости и неравномерная сопротивляемость ее перемещению, приводят к тому, что полость развивается с большой скоростью по ЛНС и происходит выталкивание разрушенной породы под действием газообразных продуктов взрыва.

2. Показано, что во всех ранее проведенных исследованиях при взрыве однорядными траншейными зарядами на выброс, в выемки возвращается 25-30 %, а при двухрядном взрыве траншейных зарядов, объем упавшего грунта составляет 35-40 %, а ширина выемки по дну доходит до 25 м.

3. В работах ряда исследователей установлено, что взрывание траншейных зарядов выброса, в условиях расположения грунтовых вод вблизи поверхности, считалось неэффективным из-за возникновения выпучивания по оси сечения выемки, образовавшимся вследствие относительно большой

текучести грунта, часть которого обратно возвращается в выемку после выброса оползает по бортам и поднимается по инерции вверх по оси выработки.

4. Исследовалась эффективность применения траншейных зарядов ВВ на выброс во время открытых работах. При этом для достижения положительного эффекта повышалось энергонасыщенность взрываеваемого массива путем увеличения удельного расхода в два и более раза, а также применения в условиях высокого расположения грунтовых вод дорогостоящих ВВ.

1.4 Цель и задачи исследования

Целью работы является определение основных параметров навала грунта на основе изучения динамики взрыва траншейных зарядов выброса для повышения их эффективности на открытых горных работах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Анализ выполненных исследований образования навала выброшенного грунта взрывами траншейных зарядов выброса
2. Математическое моделирование действия траншейных зарядов выброса в грунтах
3. Теоретические исследования динамики взрывов обвалованного грунтом траншейных зарядов выброса

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ТРАНШЕЙНЫХ ЗАРЯДОВ ВЫБРОСА В ГРУНТАХ

2.1. Основные уравнения

Теоретические основы и физико-математические модели действия взрыва в грунтах освещены в работах авторов [57-67].

Модель действия сжимаемой песчаных грунтов достаточно полно описана в работах [68-76]. Сжимаемость определяется относительным содержанием и сжимаемостью каждого компонента. Нагрузка и разгрузка такой среды происходят по одной и той же кривой диаграммы сжатия, что является аналогией деформирования нелинейно-упругой среды. Уравнение состояния грунта имеет вид [75,76]:

$$\frac{r_0}{r} = a_1 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{g_1}} + a_2 \left[\frac{g_2(p - p_0)}{r_2 c_2^2} + 1 \right]^{\frac{1}{g_2}} + a_3 \left[\frac{g_3(p - p_0)}{r_3 c_3^2} + 1 \right]^{\frac{1}{g_3}}, \quad (2.1)$$

где ρ_0 и ρ – соответственно начальная и текущая плотности грунта;

α_1 , α_2 и α_3 – содержание по объему соответственно газообразного, жидкого и твердого компонентов в среде;

ρ_2 , ρ_3 – плотности соответственно жидкого и твердого компонентов в среде;

c_2 , c_3 – скорости звука соответственно жидкого и твердого компонентов;

γ_1 , γ_2 , γ_3 – показатели изэнтропы соответствующих компонентов (плотность и скорость звука соответствуют давлению $p=p_0$).

В модели сжимаемой жидкости грунтов пренебрегают наличием скелета грунта, его способностью оказывать сопротивление действию касательных напряжений. Такой подход дает удовлетворительные результаты расчетов при больших значениях гидростатического давления.

К грунту, рассматриваемому как сплошная среда, применяют основные законы механики сплошной среды – законы сохранения количества движения,

массы и энергии. Задачи распространения взрывных волн в грунтах решают с помощью этих законов, причем формулируются они в основном для одномерных случаев, т.е. все параметры волн зависят от времени и одной пространственной координаты. Таким образом, для случая одномерных волновых задач необходимо решить следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} r\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial r}\right) - \frac{\partial s_1}{\partial r} - n\frac{s_1 - s_2}{r} &= 0; \\ \frac{\partial r}{\partial t} + u\frac{\partial r}{\partial r} + r\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{nr}{r} &= 0, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где u – скорость частиц; σ_1 и σ_2 – главные нормальные напряжения;

r – координата Эйлера; t – время; $v=0, 1, 2$ – соответственно для плоской, осевой и центральной симметрии.

Система (2.2) замыкается уравнением состояния грунта

$$p = p(\epsilon, \epsilon_m), \quad (2.3)$$

где $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$; $\epsilon = 1 - \rho_0/\rho$.

Наличие ϵ_m указывает на то, что для упругопластических моделей разгрузка и нагрузка должны описываться разными уравнениями.

Для исследования состояния пластического течения к системе (2.2) и уравнению (2.3) необходимо прибавить еще условие пластичности, которое для грунтов можно принять в виде

$$\sqrt{6T_2} = F(p); \quad (2.4)$$

$$T_2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2; \quad F(p) = kp + b, \quad (2.5)$$

где k и b – эмпирические величины, характеризующие соответственно трение и сцепление в грунте.

Уравнения движения сплошной среды в декартовой прямоугольной системе координат ($ox_1x_2x_3$) описываются системой трех уравнений [77-82]:

$$\begin{aligned} \rho(\partial v_1/\partial t + v_1\partial v_1/\partial x_1 + v_2\partial v_1/\partial x_2 + v_3\partial v_1/\partial x_3) &= F_1 + \partial\sigma_{11}/\partial x_1 + \partial\sigma_{12}/\partial x_2 + \partial\sigma_{13}/\partial x_3, \\ \rho(\partial v_2/\partial t + v_1\partial v_2/\partial x_1 + v_2\partial v_2/\partial x_2 + v_3\partial v_2/\partial x_3) &= F_2 + \partial\sigma_{21}/\partial x_1 + \partial\sigma_{22}/\partial x_2 + \partial\sigma_{23}/\partial x_3, \\ \rho(\partial v_3/\partial t + v_1\partial v_3/\partial x_1 + v_2\partial v_3/\partial x_2 + v_3\partial v_3/\partial x_3) &= F_3 + \partial\sigma_{31}/\partial x_1 + \partial\sigma_{32}/\partial x_2 + \partial\sigma_{33}/\partial x_3, \end{aligned} \quad (2.6)$$

В уравнениях (2.6), часто называемых уравнениями движения в форме Навье-Стокса, учтена симметрия тензора напряжения. В них приняты обозначения:

ρ - плотность грунта, кг/м³;

v_i - декартовы составляющие скорости, м/с;

$\partial \dots / \partial x_i, \partial \dots / \partial t$ – частное производное по координатам и времени;

F_i - декартовы компоненты массовых сил, Н/м³;

σ_{ij} - компоненты тензора напряжения, Па.

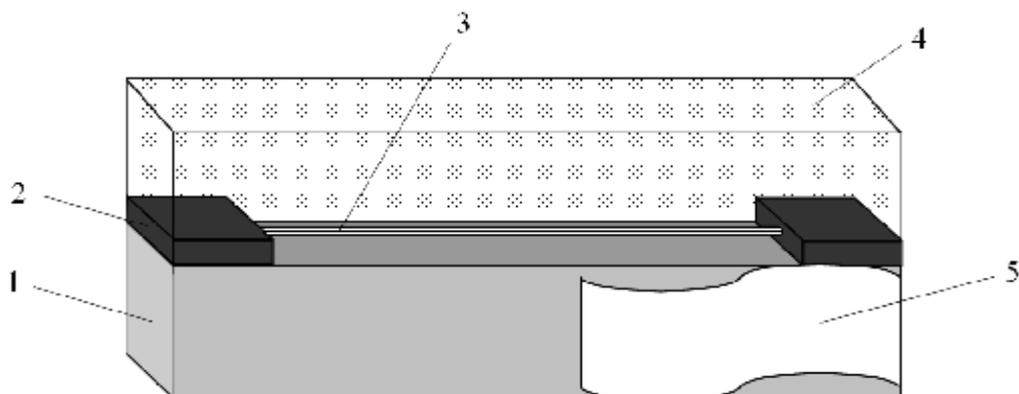
2.2. Исследование действия взрыва линейного заряда выброса в грунтах

Рассмотрим схему действия взрыва линейного заряда выброса в песчаных грунтах. На рис. 2.1, а приведена схема формирования конструкции линейного заряда выброса с применением детонирующих шнуров (ДШ).

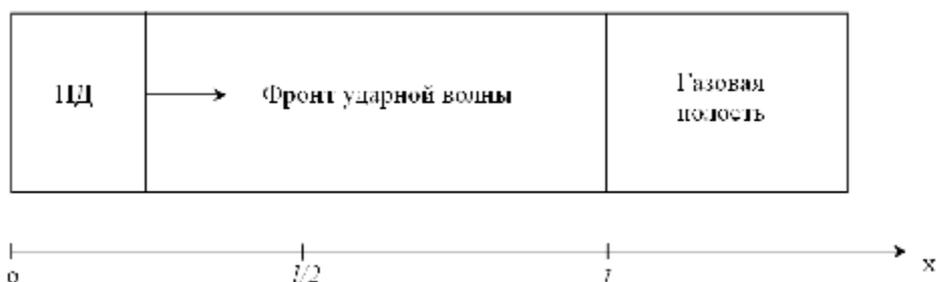
Из-за повышенной массовой влажности песчаных грунтов после проведения щели на ее дно укладывают взрывчатое вещество с гидроизоляцией полиэтиленовой пленкой, согласно методик [83-85]. На поверхность заряда укладывают не менее двух ниток ДШ и промежуточные детонаторы.

Так как ДШ детонирует со скоростью в 1,5-2 раза превышающей скорость детонации промышленных ВВ ($D_{дш}=6,5-7,5$ км/с), то первый заряд из промежуточного детонатора детонирует с задержкой в несколько десятков миллисекунд. Когда детонационная волна выходит на торец заряда ВВ, то она встречается с забойкой и газовой полостью, образованной расширяющимися продуктами детонации, от детонации ДШ происходит взаимодействие продуктов детонации первого заряда с забойкой между зарядами и продуктами детонации ДШ, находящимися в полости.

а)



б)



1 – траншейный заряд выброса

4 – грунтовая забойка и обваловка

2 – промежуточный детонатор

5 – полиэтиленовая пленка

3 – детонирующие шнуры

Рис. 2.1. Схема формирования конструкции линейного заряда выброса (а) и распределения импульса взрыва на стенках щели (б)

В результате этого взаимодействия по забойке идет фронт ударной волны. Отраженная ударная волна идет по продуктам детонации первого заряда. Так как продукты детонации ДШ к моменту подхода детонационной волны от первого заряда начинают расширяться, то сжимаемость их больше сжимаемости продуктов детонации первого заряда, поэтому при взаимодействии этих газодинамических потоков в продуктах детонации первого заряда отражается волна разрежения, а по продуктам детонации и ДШ идет ударная волна, которая препятствует расширению продуктов детонации ДШ и дополнительно сжимает их.

Аналогичные явления происходят и после детонации второго заряда из промежуточного детонатора при условии, что его продукты детонации в направлении, противоположном детонации, имеют меньшую скорость. Поэтому продукты детонации ДШ, дополнительно сжатые ударными волнами от детонации первого и второго зарядов, сдвигаются по образованной газовой полости в направлении второго заряда, и на некотором расстоянии от него образуется своеобразный газодинамический затор, где самым сложным образом взаимодействуют преломленные и отраженные ударные волны и волны разрежения. Так как продукты детонации не могут расширяться в осевом направлении, то будет происходить их радиальное расширение.

Таким образом, газовая полость, образованная от детонации ДШ, препятствует движению газов в осевом направлении и способствует их расширению в радиальном, тем самым, увеличивая время действия продуктов детонации на взрываемый массив. За счет сжатия газовой полости давление в щели понижается (т.к. от продуктов детонации ДШ в продукты детонации зарядов отражаются волны разрежения) и действует более продолжительное время. Верхняя забойка также препятствует вылету газов и способствует более равномерному распределению движения по стенкам щели.

Рассмотрим распределение взрывного импульса на стенках щели. Так как щель имеет цилиндрическую форму с бесконечно прочными стенками, то детонация начинается у левого конца заряда при $x=0$ и распространяется вдоль положительного направления оси Ox . Правый конец линейного заряда граничит с газовой полостью, образованной продуктами детонации ДШ (рис. 2.1, б). Так как левый конец линейного заряда граничит в начальный момент времени с продуктами детонации инициирующего ДШ (сильно сжатыми в момент инициирования), то рассматриваемый случай эквивалентен наличию в сечении $X=0$ жесткой стенки.

Детонационной волне всегда сопутствует в продуктах детонации волна разрежения, которая описывается следующими соотношениями [86]

$$\begin{aligned}x &= (u+c)t + F(u), \\ u &= \pm 2c(k-1) + \text{const};\end{aligned}\tag{2.7}$$

где u – скорость продуктов детонации;

c – скорость звука.

Так как детонация распространяется слева направо и ее движение в момент времени $t=0$ определено при $x=0$ (т.е. $F(u)=0$), то

$$x = (u+c)t.\tag{2.8}$$

На фронте детонационной волны

$$u_n = \frac{D}{k+1} \text{ и } c_n = \frac{kD}{k+1},$$

где k – показатель изоэнтропы.

Отсюда постоянная в (2.7)

$$\text{const} = -\frac{D}{k-1}.$$

Таким образом, волна разрежения описывается в виде

$$\frac{x}{t} = u + c; \quad u = \frac{2c - D}{k-1}.\tag{2.9}$$

Для продуктов детонации конденсированных ВВ обычно $k=3$. В этом случае уравнения принимают более простой вид:

$$\frac{x}{t} = u + c; \quad -\frac{D}{2} = u - c\tag{2.10}$$

или

$$c = \frac{x}{2t} + \frac{D}{4}; \quad u = \frac{x}{2t} - \frac{D}{4}.\tag{2.11}$$

Из анализа этих зависимостей следует, что в интервале

$$0 \leq x \leq \frac{D}{2} \quad u = 0 \quad \text{и} \quad c = \frac{D}{2}.$$

Таким образом, в интервале

$$\frac{Dt}{2} \leq x \leq Dt$$

детонационная волна характеризуется уравнениями (2.11). Назовем эту волну

первой. Для этой волны $\frac{P_1}{P_n} = \left(\frac{C}{C_n}\right)^3$, а

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{S_0 D^2}{4} \quad \text{и} \quad c_n = \frac{3}{4} D \\ \frac{P_1}{P_n} &= \frac{8}{27} \left(\frac{x}{Dt} + \frac{1}{2} \right)^3. \end{aligned} \quad (2.12)$$

В интервале $0 \leq x \leq \frac{Dt}{2}$

$$u = 0; \quad c = \frac{D}{2}; \quad (2.13)$$

назовем эту волну второй. Для этой волны

$$\frac{P_2}{P_n} = \frac{8}{27}. \quad (2.14)$$

В момент времени $t = \frac{l}{D}$ в сечении l продукты детонации начинают истечение в газовую полость. В результате этого в продуктах детонации возникает волна разрежения, которая распространяется по возмущенному газу и описывается общими уравнениями газовой динамики:

$$x = (u+c)t + F(u+c); \quad x = (u-c)t + F(u-c). \quad (2.15)$$

Так как при $x=l$ $Dt=l$, то

$$l = \left(\frac{D}{4} + \frac{3}{4} D \right) \frac{l}{D} + F_1(u+c); \quad l = (u-c) \frac{l}{D} + F_2(u+c),$$

откуда $F_1(u)=0$ и $F_2 = \frac{Dl - (u-c)l}{D}$.

Тогда

$$u + c = \frac{x}{t}; \quad u - c = \frac{D(x-l)}{Dt-l}. \quad (2.16)$$

Следовательно, возникающая волна разрежения описывается уравнениями:

$$u = \frac{x}{2t} + \frac{D(x-l)}{2(Dt-l)}; \quad c = \frac{D}{2} \left(\frac{x}{Dt} - \frac{x-l}{Dt-l} \right) \quad (2.17)$$

Назовем ее третьей. Для этой волны

$$\frac{P_3}{P_n} = \left(\frac{c}{c_n} \right)^3 = \frac{8}{27} \left[\frac{x}{Dt} - \frac{x-l}{Dt-l} \right]^3. \quad (2.18)$$

Третья волна движется по закону

$$x = \frac{3}{2}l - \frac{Dt}{2}. \quad (2.19)$$

Слабый разрыв в детонационной волне (2.14) движется по закону

$$x = \frac{Dt}{2}. \quad (2.20)$$

Как следует из (2.19) и (2.20), в момент времени $t = \frac{3l}{2D}$ в сечении $x = \frac{3}{4}l$

третья волна встречает слабый разрыв, отделяющий два различных режима детонационной волны. Возникает четвертая волна, являющаяся римановской ($\rho = \text{const}$). Она описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} u + c &= \text{const}; \\ u - c &= \frac{D(x-l)}{Dt-l}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

В точке взаимодействия этой волны со слабым разрывом $u=0$

$$c = \frac{D}{2} \text{ или } \text{const} = \frac{D}{2} \text{ и } u + c = \frac{D}{2}.$$

Следовательно,

$$u = \frac{D}{2} \left[\frac{1}{2} + \frac{x-l}{Dt-l} \right]; \quad c = \frac{D}{2} \left[\frac{1}{2} - \frac{x-l}{Dt-l} \right]. \quad (2.22)$$

Правый фронт ее движется по закону

$$x = \frac{Dt}{2}; \quad (2.23)$$

левый фронт – по закону

$$x = \frac{3}{2}l - \frac{Dt}{2}; \quad (2.24)$$

Для этой волны

$$\frac{P_4}{P_n} = \frac{8}{27} \left[\frac{1}{2} - \frac{x-l}{Dt-l} \right]^3. \quad (2.25)$$

В сечении $x=0$ в момент времени $t = \frac{3l}{D}$ возникает отраженная волна разрежения, которая описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} x &= (u + c)t + F_1(u + c), \\ x &= (u - c)t + F_2(u - c). \end{aligned} \quad (2.26)$$

Для этой волны

$$u = \frac{Dx}{Dt - l}; \quad c = \frac{Dl}{Dt - l}. \quad (2.27)$$

Назовем ее пятой. Она движется по закону:

$$x = \frac{Dt}{2} - \frac{3}{2}l. \quad (2.28)$$

Давление в этой волне определяется из соотношения:

$$\frac{P_5}{P_n} = \frac{64}{27} \left[\frac{l}{Dt - l} \right]^3. \quad (2.29)$$

Для произвольного значения x в области $0 \leq x \leq \frac{3}{4}l$ импульс давления

$$i = \int_{t_1}^{t_2} P_1 dt + \int_{t_2}^{t_4} P_2 dt + \int_{t_4}^{t_5} P_4 dt + \int_{t_5}^{\infty} P_5 dt, \quad (2.30)$$

где

$$t_1 = \frac{x}{D}; \quad t_2 = \frac{2x}{D}; \quad t_4 = \frac{3l - 2x}{D}; \quad t_5 = \frac{3l + 2x}{D}. \quad (2.31)$$

В области $\frac{3}{4}l \leq x \leq l$ импульс определяется по формуле

$$i_2 = \int_{t_1}^{t_3} P_1 dt + \int_{t_3}^{t_4} P_3 dt + \int_{t_4}^{t_5} P_4 dt + \int_{t_5}^{\infty} P_5 dt, \quad (2.32)$$

где

$$t_1 = \frac{x}{D}; \quad t_4 = \frac{2x}{D}; \quad t_3 = \frac{3l - 2x}{D}; \quad t_5 = \frac{3l + 2x}{D}. \quad (2.33)$$

Произведя интегрирование, получим:

$$i_1 = \frac{i_0}{16} \left[\frac{16 + 23n + 8n^2 - 15n^3}{(1 - n)^3} + 3(1 - n) \ln \frac{1 + n}{1 - n} + 3n \ln 2 \right], \quad (2.34)$$

где

$$i_0 = \frac{8}{27} r_0 l D; \quad n = \frac{x}{l}.$$

Выражение (2.33) дает при $n=1$ $i=0,25i_0$.

Импульс начинает падать по направлению к торцу заряда, причем сначала падение будет медленным, затем, вследствие истечения продуктов детонации, становится быстрым. Вышеприведенный расчет не учитывает наличия газодинамического затора, препятствующего истечению продуктов детонации заряда. С учетом этого параметры взрывного импульса будут распределены равномерно. Так, в сечении $\frac{3}{4}l \leq x \leq l$ параметры импульса будут падать значительно медленнее.

Максимальное давление во фронте ударной волны определяется по эмпирической формуле [75]

$$P_{\max} = k_1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{n_1}, \text{ кгс/см}^2, \quad (2.35)$$

где R – расстояние до места взрыва, м;

Q – масса заряда, кг;

k_1, n_1 – коэффициенты, учитывающие свойства грунтового массива.

Значения коэффициентов k_1 и n_1 для песчаных грунтов приведены в табл. 2.1 [75].

Экспериментальными исследованиями установлено изменение максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от расстояния до места взрыва при различных содержаниях воздуха в грунтовом массиве, результаты которого приведены на рис. 2.2.

Таблица 2.1

Содержание воздуха, α_1	k_1	n_1
0	600	1,05
$5 \cdot 10^{-4}$	450	1,5
10^{-2}	250	2
$4 \cdot 10^{-2}$	45	2,5

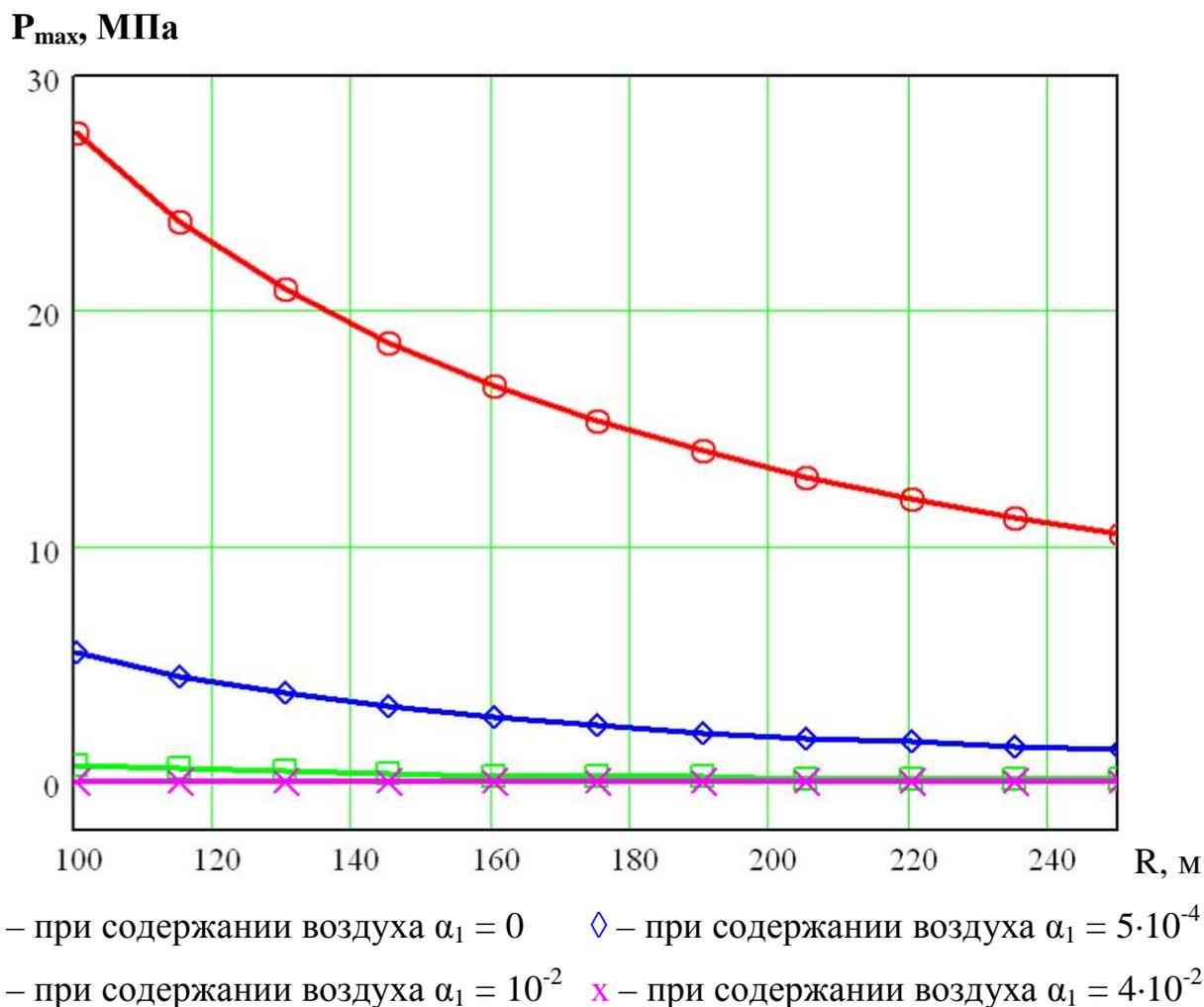
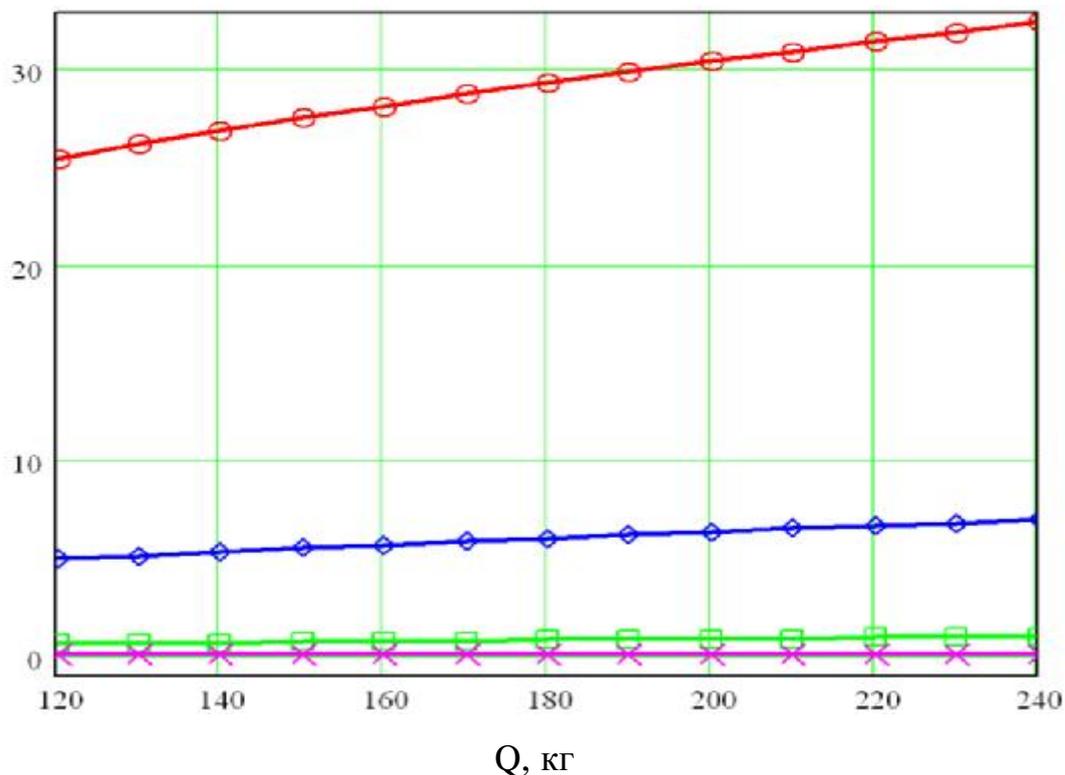


Рис. 2.2. Изменение максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от расстояния до места взрыва при различных содержаниях воздуха в грунтовом массиве

Установлено, что при отсутствии содержания воздуха в грунтовом массиве и увеличении расстояния до места взрыва от 100 до 250 м максимальное давление во фронте ударной волны уменьшается от 27 до 11 МПа. Увеличение содержания воздуха приводит к снижению максимального давления во фронте ударной волны.

На рис.2.3 приведено изменение максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от массы заряда ВВ при различных содержаниях воздуха в грунтовом массиве.

P_{\max} , МПа



- – при содержании воздуха $\alpha_1 = 0$ ◇ – при содержании воздуха $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-4}$
□ – при содержании воздуха $\alpha_1 = 10^{-2}$ × – при содержании воздуха $\alpha_1 = 4 \cdot 10^{-2}$

Рис. 2.3. Изменение максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от массы заряда ВВ при различных содержаниях воздуха в грунтовом массиве

Установлено, что при отсутствии содержания воздуха в грунтовом массиве и увеличении массы заряда ВВ от 120 до 240 кг максимальное давление во фронте ударной волны увеличивается от 26 до 32 МПа. Увеличение содержания воздуха в грунтовом массиве также приводит к уменьшению максимального давления во фронте ударной волны.

Удельный импульс давления определяется по формуле:

$$I = \int_0^{\tau} P_{\max}(t) dt, \text{ кгс} \cdot \text{с} / \text{см}^2, \quad (2.36)$$

где t – время действия фазы сжатия, с;

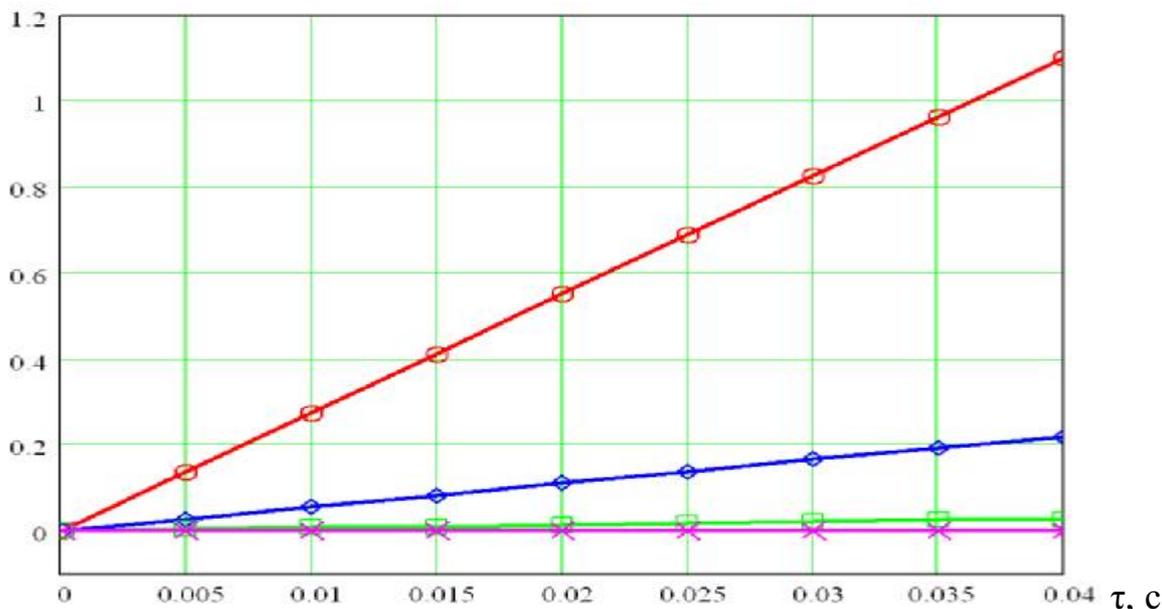
τ – время действия максимального давления во фронте ударной волны, с.

Исследованиями установлено изменение времени действия максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от удельного импульса давления, результаты которого приведено на рис. 2.4.

При увеличении времени действия максимального давления во фронте ударной волны от 0 до 0,04 удельный импульс давления увеличивается от 0 до 1,1 МПа·с. Установлено, что увеличение содержания воздуха в грунте приводит к снижению удельного импульса давления.

Таким образом, установлены изменение максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от расстояния до места взрыва и массы заряда ВВ, а также изменение времени действия максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от удельного импульса давления при различных содержаниях воздуха в грунтовой массе.

I, МПа·с



○ – при содержании воздуха $\alpha_1 = 0$ ◇ – при содержании воздуха $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-4}$
 □ – при содержании воздуха $\alpha_1 = 10^{-2}$ × – при содержании воздуха $\alpha_1 = 4 \cdot 10^{-2}$

Рис. 2.4. Изменение времени действия максимального давления во фронте ударной волны в зависимости от удельного импульса давления при различных содержаниях воздуха в грунтовой массе

2.3. Развитие газовой полости при взрыве заглубленного линейного заряда выброса при образовании удлиненных выемок

Образование удлиненных выемок при взрыве заглубленного линейного заряда выброса в песчаных грунтах является в настоящее время сложной технологической задачей. Сложность состоит в том, что при определенных массах зарядов и глубинах их заложения происходит сразу же после их взрыва оплывание бортов и вспучивание дна выемки. Причина такого нежелательного явления при образовании открытых выемок объясняется тем, что песчаный грунт перед взрывом находится в недоуплотненном состоянии и под действием взрыва приходит в разжиженное состояние. В разжиженном грунте связи между твердыми частицами отсутствуют, и поэтому они под действием избыточного давления могут быть вытеснены как из бортов, так и со дна выемки.

Уплотнение песчаных грунтов с помощью энергии взрыва для различных задач по образованию удлиненных выемок возможно лишь при всестороннем теоретическом и экспериментальном изучении напряженно-деформированного состояния этих грунтов.

Рассмотрим схему развития газовых полостей вокруг искусственно заглубленного линейного заряда выброса, приведенную в работе [88].

Согласно рис. 2.5, щель в песчаных грунтах проводят при глубине, равной уровня грунтовых вод. Обваловку линейного заряда выброса производят грунтом, извлекаемом из контура профильного сечения выемки. При этом глубина заложения линейного заряда искусственно увеличивается на расстояние $h_{обв}$.

После взрыва линейного заряда выброса под воздействием газообразных продуктов взрыва формируется фронт ударной волны, энергия которого передается равномерно во все стороны массива песчаного грунта, уплотняя ее вокруг зарядной камеры. Направление скорости движения газовой полости линейного заряда выброса будет максимальной по фактической линии

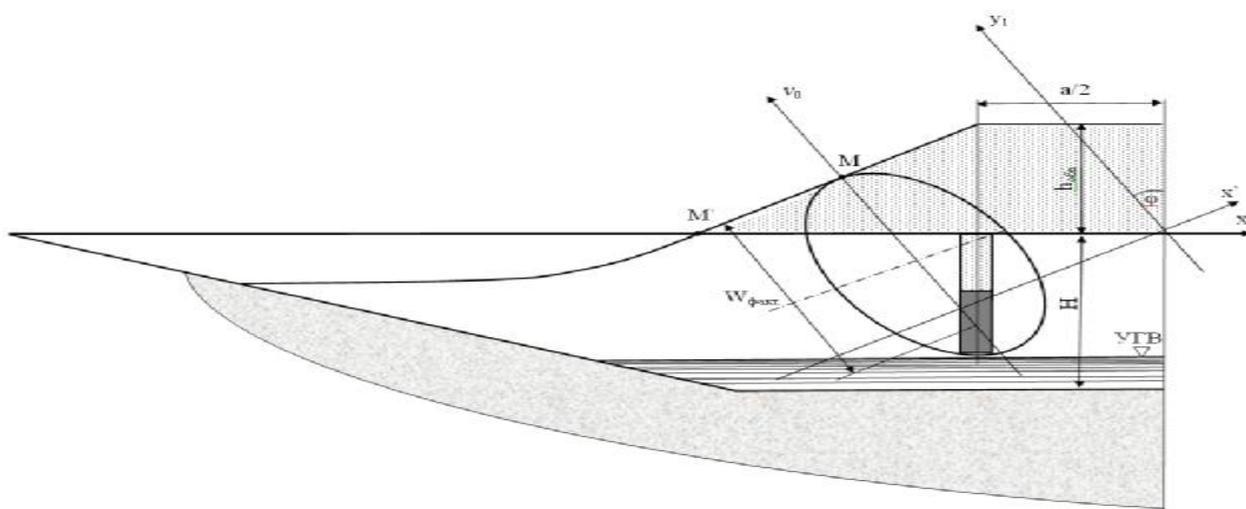
наименьшего сопротивления (ЛНС). Схема, приведенная на рис. 2.5, показывает, что угол направления движения фронта ударной волны равен углу грунтовой обваловки заряда выброса. За счет резкого сопротивления грунта в различных направлениях симметрия в поле смещения нарушается и газовая полость начинает вытягиваться по фактической ЛНС. Форма полости приближается к эллиптической, большая ось которой совпадает с ЛНС. Поскольку путь пробега фронта ударной волны по ЛНС является минимальным, то скорость смещения и кинетическая энергия перемещаемого грунта в этом направлении является максимальной.

Поднятая масса оказывается в пределах оболочки, оконтуренной изнутри поверхностью полости, а снаружи – поверхностью параболоида вращения. Наибольшую толщину оболочка имеет в своей нижней части, где она еще связана с грунтовым массивом, наименьшую – в верхней.

Неравномерное размещение грунта в различных частях оболочки и неодинаковая сопротивляемость ее перемещению приводит к тому, что верхняя часть оболочки продолжает перемещаться с большой скоростью, тогда как ее нижняя часть, обладая большей массой и будучи связанная с грунтовым массивом, перемещается с меньшей скоростью. Поэтому она быстро теряет свой начальный запас кинетической энергии. Таким образом, верхняя часть оболочки быстрее увеличивается в объеме по сравнению с нижней. В момент, близкий к концу процесса, толщина верхней части оболочки уменьшается настолько, что силы сцепления между частицами среды становятся незначительными. Подъем грунтового потока представляет собой полет отдельных кусков, частиц и верхняя часть оболочки раскрывается полностью. Основная масса поднятого грунтового потока оказывается сосредоточенной в средней и нижней частях оболочки. Поскольку средняя часть оболочки обладает большей скоростью по сравнению с нижней, она отклоняется от оси выемки на большее расстояние. Масса оболочки, израсходовав свой

кинетический запас энергии, опускается под тяжестью собственного веса, образуя открытую выемку.

Таким образом, происходит развитие газовой полости заглубленного линейного заряда выброса при образовании удлиненных выемок в песчаных грунтах, направление скорости движения которой максимальна по фактической ЛНС, а угол направления ее равен углу грунтовой обваловки зарядов выброса.



УГВ – уровень грунтовых вод

М

$W_{\text{факт}}$ – фактическая ЛНС, м

между линейными зарядами выброса, м

$h_{\text{обв}}$ – высота грунтовой обваловки, м
грунтовой обваловки

v_0 – скорость движения газовой полости
линейного заряда выброса, м/с

Н – глубина выемки,

а – расстояние

φ – угол наклона

Рис. 2.5. Схема действия взрыва линейного заряда выброса в песчаных грунтах

Выводы по главе 2

1. Установлены зависимости изменения максимального давления во фронте ударной волны от расстояния до места взрыва и массы заряда ВВ, а также изменения времени действия максимального давления во фронте ударной волны от удельного импульса давления в различных песчаных грунтах. Увеличение содержания воздуха в песчаном грунте приводит к уменьшению

максимального давления во фронте ударной волны и снижению удельного импульса давления.

2. Исследовано развитие газовой полости заглубленного линейного заряда выброса при образовании удлиненных выемок в песчаных грунтах. Установлено, что скорость движения грунтового потока при взрыве на выброс максимальна по фактической ЛНС, а угол направления ее равен углу грунтовой обваловки зарядов выброса.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВЗРЫВОВ ОБВАЛОВАННОГО ГРУНТОМ ТРАНШЕЙНЫХ ЗАРЯДОВ ВЫБРОСА.

Во втором разделе представлены теоретические исследования динамики взрывов обвалованного грунтом траншейных зарядов ВВ на выброс. Приведены уравнения для расчета параметров обваловки продуктов детонации и кусков отбрасываемого грунта. В соответствии с классическим подходом рассматриваются три фазы взрыва: камуфлетная, поршневая и фаза разлета. Состояние продуктов детонации описывается адиабатическим уравнением с показателем, зависящим от типа ВВ. При рассмотрении камуфлетной фазы взрыва определяется форма взрывной полости, зависящая от деформации грунта в различных направлениях с учетом обваловки грунтом траншейных зарядов выброса. При расчете начальных скоростей, дальности и времени отброса грунтового потока учитывается лобовое сопротивление воздуха и угол бросания грунтового потока путем управления направления выброса за счет изменения параметров обваловки траншейных зарядов.

3.1. Основные уравнения

3.1.1 Уравнения движения

Уравнения движения сплошной среды в декартовой прямоугольной системе координат ($ox_1x_2x_3$) описываются системой трех уравнений [88-93]:

$$\begin{aligned} \rho(\partial v_1/\partial t + v_1\partial v_1/\partial x_1 + v_2\partial v_1/\partial x_2 + v_3\partial v_1/\partial x_3) &= F_1 + \partial\sigma_{11}/\partial x_1 + \partial\sigma_{12}/\partial x_2 + \partial\sigma_{13}/\partial x_3, \\ \rho(\partial v_2/\partial t + v_1\partial v_2/\partial x_1 + v_2\partial v_2/\partial x_2 + v_3\partial v_2/\partial x_3) &= F_2 + \partial\sigma_{21}/\partial x_1 + \partial\sigma_{22}/\partial x_2 + \partial\sigma_{23}/\partial x_3, \\ \rho(\partial v_3/\partial t + v_1\partial v_3/\partial x_1 + v_2\partial v_3/\partial x_2 + v_3\partial v_3/\partial x_3) &= F_3 + \partial\sigma_{31}/\partial x_1 + \partial\sigma_{32}/\partial x_2 + \partial\sigma_{33}/\partial x_3, \end{aligned} \quad (3.1)$$

В уравнениях (3.1), часто называемых уравнениями движения в форме Навье-Стокса, учтена симметрия тензора напряжения. В них приняты обозначения:

ρ - плотность грунта, кг/м³;

v_i - декартовые составляющие скорости, м/с;

$\partial \dots / \partial x_i, \partial \dots / \partial t$ – частное производное по координатам и времени;

F_i - декартовы компоненты массовых сил, Н/м³;

σ_{ij} - компоненты тензора напряжения, Па.

3.1.2 Физические соотношения

В упругом сплошном твердом теле в геометрически линейной постановки [88] напряжения пропорциональны деформациям:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} (\partial u_k / \partial x_l + \partial u_l / \partial x_k), \quad (3.2)$$

где E_{ijkl} – коэффициенты обобщенного закона Гука, Па;

u_i – компоненты вектора перемещения, м.

По неммым индексам k, l в уравнении (3.2) проводится суммирование.

Для вязкой жидкости напряжения пропорциональны градиентам скоростей:

$$\sigma_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + \mu (\partial v_i / \partial x_j + \partial v_j / \partial x_i), \quad (3.3)$$

где p – давление, Па;

μ - динамический коэффициент вязкости среды, Па·с;

δ_{ij} – символ Кронеккера.

3.1.3 Уравнение неразрывности

Фундаментальные уравнения механики сплошной среды, уравнение неразрывности или закон сохранения массы имеют вид [89]:

$$\partial \rho / \partial t + \rho (\partial v_1 / \partial x_1 + \partial v_2 / \partial x_2 + \partial v_3 / \partial x_3) = 0. \quad (3.4)$$

Для несжимаемой жидкости уравнение принимает вид:

$$\operatorname{div}(\mathbf{v})=0. \quad (3.5)$$

Для потенциальных течений:

$$\mathbf{v}=\operatorname{grad}(\Phi). \quad (3.6)$$

Уравнение неразрывности принимает вид:

$$\Delta\Phi=0. \quad (3.7)$$

3.1.4 Постановка задачи и методы их решения

При исследованиях жидких сред, система уравнений (3.1), (3.3) и (3.4) является полной и содержит 10 неизвестных величин: три компонента скорости, шесть компонентов тензора напряжения и плотность.

При анализе движения твердых тел имеет место система из 13 уравнений (3.1), (3.2), (3.4) и трех уравнений в связи компонент скорости частиц с их перемещениями:

$$v_i=\partial u_i/\partial t, \quad (3.8)$$

При решении необходимо удовлетворить граничным и начальным условиям.

Для достаточно простых областей широко используются аналитические методы [91-96], для более сложных областей - сеточные [96], а также элементные аппроксимации систем уравнений [97-99]. Система исходных уравнений (3.1-3.4) сводится к системе алгебраических уравнений, анализ которых проводится методами линейной алгебры.

3.2. Основные закономерности

В соответствии с работами ученых [5,100,101] при развитии взрыва можно выделить следующие фазы:

- детонация взрывчатого вещества;
- разрушение горного массива волнами сжатия и растяжения, а также расширение взрывной полости до камуфлетной;
- ускорение разрушенной породы под действием продуктов детонации, разрушение купола отбрасываемой массы во время движения и прорыв взрывных газов в атмосферу;
- разлет кусков породы, приземление породы и формирование профиля навала.

В соответствии с практическим опытом [92,102-107] доля энергии идущая на ускорение грунтового потока крупномасштабного взрыва достигает 75-85 %.

Особенность поведения взрывных газов проявляется различными закономерностями поведения при больших и маленьких полостях. Для большинства ВВ при больших полостях уравнение состояния близко к уравнению адиабаты с показателем равным порядка 1,8-3,0 [2,75,107-110]. Для граммонита 79/21 при плотности 0,9 т/м³ показатель равен 1,5-2,2; для аммонита 6ЖВ - 1,9-2,0; для гранулита АС-8 - 1,52. При дальнейшем уменьшении плотности ВВ поведения продуктов детонации удовлетворительно описывается уравнением адиабаты с показателем 1,4-1,25 [102]. Показатель степени асимптотических адиабат при больших плотностях изменяется в диапазоне 2,8-3,3 для плотностей заряжания 0,8-1,59 т/м³. В работе [21] также отмечается, что при плотности заряжания 0,5-0,6 т/м³ расширение идет так, как если бы вся энергия продуктов взрыва была упругой, то есть по политропе с показателем степени порядка трех, а затем изотропе Пуассона с показателем 1,15-1,30. Основные характеристики ВВ [110] приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Характеристика гранулированных ВВ, применяемых на открытых и подземных горных работах в шахтах и рудниках, неопасных по взрыву газа и пыли

Название ВВ	Плотность ВВ, $\rho_{\text{ВВ}}$, кг/м ³	Скорость детонации, D, м/с	Теплота взрыва, Q, кДж/кг	Работа взрыва, A, кДж/кг	Показатель адиабаты, γ
Граммонит 79/21, ГОСТ 21988-76	800-850	3200-4000	4285	3561	1,9
Гранулит АС-4, ГОСТ 21987-76	850-900	2600-3500	4522	3645	1,54
Гранулит АС-4В, ТУ 85-620-82	800-850	3000-3500	4522	3645	1,56
Гранулит АС-8, ГОСТ 21987-76	870-950	3000-3600	5191	3993	1,52
Гранулит АС-8В, ТУ 84-620-82	800-850	3000-3600	5233	3997	1,56
Гранулит М, ГОСТ 21987-76	780-820	2500-3600	3852	3163	1,48
Гранулит С-2, ГОСТ 21987-76	800-850	2200-3000	3939	3159	-

3.3. Уравнение состояния продуктов взрыва. Определение геометрических размеров обваловки грунтом траншейных зарядов выброса

Уравнение состояния продуктов детонации с достаточной точностью описывается уравнением:

$$p=p_0(V_0/V)^\gamma, \quad (3.9)$$

где p_0, p - начальное и текущее давление взрыва, Па;

V_0, V - начальный и текущий объем взрывной полости, м³;

γ - показатель степени, абсолютные значения которого приведены в табл. 3.1.

В случае двумерного движения в плоскости (x, y) в качестве объемов V_0, V можно использовать соответствующие сечения S_0, S в этой плоскости.

Энергия взрыва E_1 , отнесенная к единице ширины в направлении z , будет вычисляться по формуле:

$$E_1=pS_0/(\gamma-1). \quad (3.10)$$

Начальная энергия взрыва, равная теплоте химического превращения ВВ, определяется по выражению:

$$pV_0 /(\gamma-1)=Q \cdot m \quad (3.11)$$

или

$$pV_0 /(\gamma-1)=Q \cdot \rho V_0,$$

где Q – теплота реакции взрывного превращения, Дж/кг;

m – масса ВВ, кг;

ρ - плотность ВВ, кг/м³.

Давление в полости взрыва определяется по формуле:

$$p=Q \cdot \rho(\gamma-1). \quad (3.12)$$

При теплоте взрыва равной $4,285 \cdot 10^6$ Дж/кг для граммонита 79/21 и плотности заряжания 850 кг/м³, получаем давление $3,278 \cdot 10^9$ Па.

Далее рассмотрим схему развития газовой полости вокруг искусственно заглубленного траншейного заряда ВВ шириной щелей равной 0,8 м и глубиной Н в грунтовом массиве, схема которого приведена на рис.3.1.

Линия наименьшего сопротивления траншейного заряда составляет W. Произведем обваловку траншейного заряда грунтом, извлекаемом в контуре сечения выемки бульдозерами марки С-130. При этом глубина заложения заряда искусственно увеличивается на расстоянии $h_{обв}$. Угол обваловки и расстояние между рядами траншейных зарядов определяется соответственно - φ и a .

Под воздействием газообразных продуктов взрыва формируется волна, энергия которой передается равномерно во все стороны массива, уплотняя ее вокруг зарядной камеры и образует полость. Направление скорости движения будет максимальным по фактической ЛНС. Схема, приведенная на рис.3.1., показывает, что угол направления ударной волны равняется углу обваловки грунта траншейных зарядов ВВ.

За счет резкого сопротивления грунта в разных направлениях симметрия в поле смещения нарушается и полость начинает вытягиваться по ЛНС. Форма полости приближается к эллиптической, большая ось которой совпадает с ЛНС. Поскольку путь пробега волны по ЛНС является минимальным, то скорость смещения и кинетическая энергия перемещающегося грунта в этом направлении является максимальной.

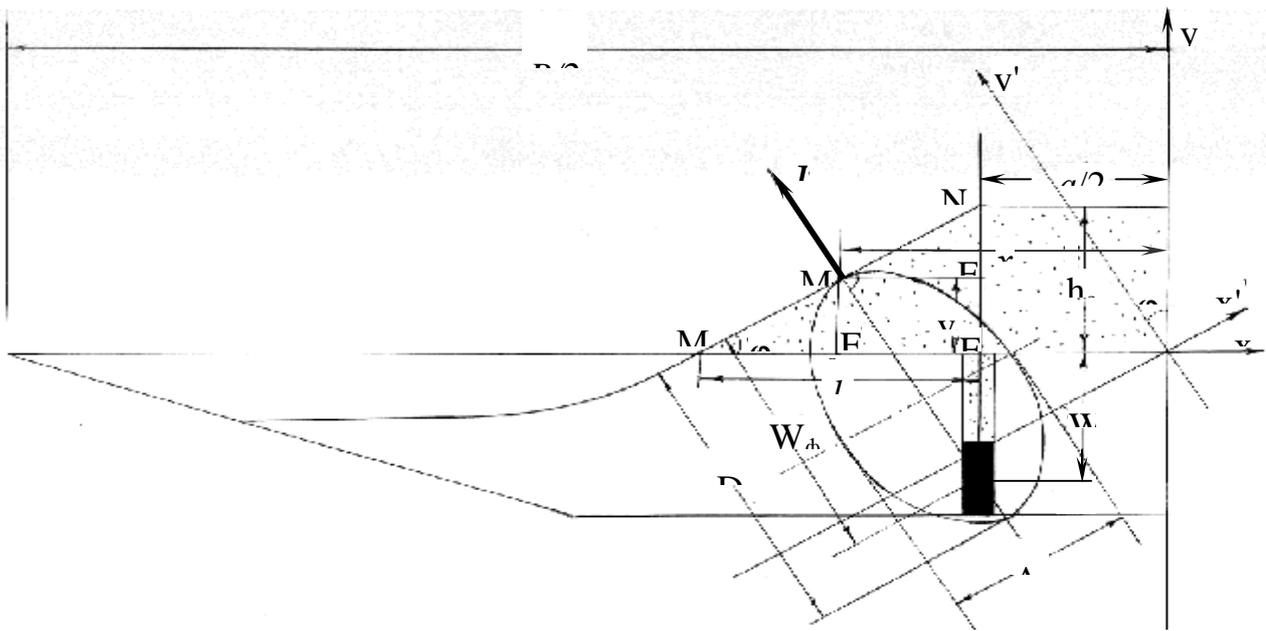


Рис.3.1. Схема развития газовой полости взрыва, обвалованного грунтом линейного заряда выброса в грунтовом массиве

вращения. Наибольшую толщину оболочка имеет в своей нижней части, где она еще связана с грунтовым массивом, наименьшую – в верхней.

Неравномерное размещение грунта в различных частях оболочки и неодинаковая сопротивляемость ее перемещению приводит к тому, что верхняя часть оболочки продолжает перемещаться с большой скоростью, тогда как ее нижняя часть, обладая большой массой и будучи связанная с грунтовым массивом, перемещается с меньшей скоростью. По этому она быстро теряет свой начальный запас кинетической энергии. Таким образом, верхняя часть оболочки быстрее увеличивается в объеме по сравнению с нижней. В момент, близкий к концу процесса, толщина верхней части оболочки уменьшается настолько, что силы сцепления между частицами среды становятся незначительными. Подъем грунтового потока представляет собой полет отдельных кусков, частиц и верхняя часть оболочки раскрывается полностью. Теперь основная масса поднятого грунтового потока оказывается

сосредоточенной в средней и нижней частях оболочки. Поскольку средняя часть оболочки обладает большей скоростью по сравнению с нижней, она отклоняется от оси выемки на большее расстояние. Масса оболочки, израсходовав свой кинетический запас энергии, опускается под тяжестью собственного веса, образуя открытую выемку. Так как основная масса грунта была сосредоточена в нижней части оболочки, то после ее опускания у краев выемки образуется высокий гребень.

Согласно рис.3.1., контактные границы продуктов детонации и грунтового массива в декартовой системе координат описываются в следующем виде:

$$\frac{X^2}{A^2} + \frac{Y^2}{D^2} = 1, \quad (3.13)$$

где A, D – соответственно ширина и высота газовой полости, м.

При повороте декартовой системы координат, создаваемой углами обваловки грунтом траншейных зарядов выброса, на угол равны $-\varphi$, формула преобразуется в следующий вид:

$$\begin{aligned} X &= x' \cos j + y' \sin j, \\ Y &= -x' \sin j + y' \cos j. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Из рис.3.1. видно, что

$$\begin{aligned} x' &= x - \frac{a}{2}, \\ y' &= y + W, \\ \bar{1} &= \frac{a}{2}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Тогда

$$\begin{aligned} X &= (x \pm \bar{\mathbf{I}})\cos j + (y + W)\sin j , \\ Y &= -(x \pm \bar{\mathbf{I}})\sin j + (y + W)\cos j . \end{aligned} \quad (3.16)$$

Учитывая (3.14-3.16), уравнения эллипса принимают следующий вид:

$$\frac{[(x \pm \bar{\mathbf{I}})\cos j + (y + W)\sin j]^2}{A^2} + \frac{[-(x \pm \bar{\mathbf{I}})\sin j + (y + W)\cos j]^2}{D^2} = 1 . \quad (3.17)$$

Решение уравнения (3.17), приведено в приложении 1.

Из рис.3.1. видно, что фактическая ЛНС равна:

$$W_{\phi}^2 = x^2 + (y + W)^2 . \quad (3.18)$$

Учитывая, что треугольник MNE и M'NE' подобны, то получим:

$$\begin{aligned} \frac{h_{o\bar{o}e}}{\mathbf{1}} &= \frac{y}{\mathbf{1} - x} , \\ h_{o\bar{o}e} &= \mathbf{1} \cdot \operatorname{tg} j . \end{aligned} \quad (3.19)$$

Отсюда

$$y = \frac{(\mathbf{1} - x)h_{o\bar{o}e}}{\mathbf{1}} = \frac{\left(\frac{h_{o\bar{o}e}}{\operatorname{tg} j} - x\right)h_{o\bar{o}e}}{\frac{h_{o\bar{o}e}}{\operatorname{tg} j}} = \frac{(h_{o\bar{o}e} - x \cdot \operatorname{tg} j)h_{o\bar{o}e}}{h_{o\bar{o}e}} = h_{o\bar{o}e} - x \cdot \operatorname{tg} j , \quad (3.20)$$

тогда

$$W_{\phi}^2 = x^2 + (h_{обв} - x \cdot tgj + W)^2$$

или

$$W_{\phi} = \sqrt{x^2 + (h_{обв} - x \cdot tgj + W)^2} \quad (3.21)$$

В результате математической обработки формул (3.19-3.20) получены геометрические размеры обваловки грунта траншейных зарядов выброса.

Высота обваловки грунта траншейных зарядов выброса:

$$h_{обв} = \sqrt{W_{\phi}^2 - x^2} + x \cdot tgj - W, \text{ м.} \quad (3.22)$$

Расстояние от оси зарядной траншеи до точки пересечения поверхности обваловки грунта с горизонтом выемки определяется по формуле:

$$\mathbf{l} = \frac{h_{обв}}{tgj} = \frac{1}{tgj} \left(\sqrt{W_{\phi}^2 - x^2} + x \cdot tgj - W \right), \text{ м.} \quad (3.23)$$

Ширина обваловки грунта траншейных зарядов выброса определяется по формуле:

$$L_{обв} = 2(\mathbf{l} + \mathbf{l}_{зар}) = 2 \left[\frac{1}{tgj} \left(\sqrt{W_{\phi}^2 - x^2} + x \cdot tgj - W \right) + \frac{a}{2} \right], \text{ м,} \quad (3.24)$$

где $\mathbf{l}_{зар} = \frac{a}{2}$ - расстояние от оси зарядной траншеи до оси симметрии сечения выемки, м;

a - расстояние между рядами траншейных зарядов ВВ, м.

На рис.3.2. приведена расчетная схема оценки угла обваловки грунтом траншейных зарядов выброса. Объем выброшенного грунта на 1 м взрываемого

блока прямо пропорционален произведению фактической ЛНС и расстоянию между рядами зарядных траншей:

$$V = \bar{b}^* \cdot \bar{c}^* . \quad (3.25)$$

Из рис.3.2. видно, что

$$\begin{cases} W_{\phi} = (W + h_{обв}) \cos j , \quad \text{м,} \\ \bar{c}^* = y_1 \frac{a}{2} = y_1 W_{\phi} \sin j , \quad \text{м,} \\ \bar{b}^* = y_2 W_{\phi} = y_2 (W + h_{обв}) \cos j , \quad \text{м,} \end{cases} \quad (3.26)$$

где $\psi = \psi_1 \cdot \psi_2$ – пропорциональный коэффициент.

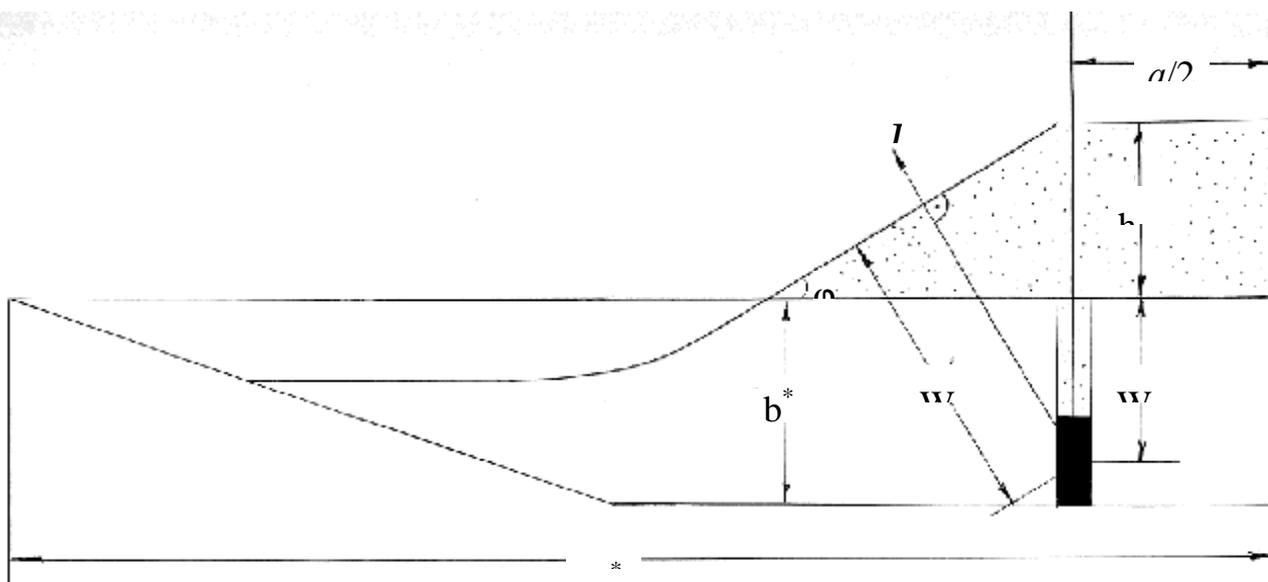


Рис.3.2. Расчетная схема определения угла обваловки грунтом траншейных зарядов выброса.

Тогда объем выброшенного грунта определяется по формуле:

$$V = \gamma(W + h_{обс})^2 \cdot \cos^2 j \cdot \sin j, \text{ м}^3 \quad (3.27)$$

или

$$V = \gamma W_{\phi}^2 \cdot \sin j, \text{ м.} \quad (3.28)$$

Для того, чтобы объем выброшенного грунта из сечения выемки был максимальным, необходимо произведение от функции V_{ϕ} приравнять к нулю:

$$V'_{\phi} = \gamma(W + h_{обс})^2 \cdot (\cos^2 j \cdot \sin j)' = 0.$$

Поскольку выражение $\gamma(W + h_{обс})^2 \neq 0$ и постоянное, то в дальнейшем анализируем их в следующем виде:

$$(\cos^2 j \cdot \sin j)' = 0 \quad \text{или} \quad \left(\frac{1}{2} \sin^2 j \cdot \cos j \right)' = 0,$$

$$\frac{1}{2} (\sin 2j \cdot \cos j)' = \frac{1}{2} (2 \cos 2j \cdot \cos j - \sin 2j \cdot \sin j) = 0,$$

$$\begin{aligned} \cos 2j \cdot \cos j - \sin^2 j \cdot \cos j' &= 0, \\ (\cos^2 j - \sin^2 j - \sin^2 j) \cos j &= 0, \\ (\cos^2 j - 2 \sin^2 j) \cos j &= 0, \\ (\cos^2 j - 2 \sin^2 j) &= 0. \end{aligned}$$

При $\cos j \neq 0, j \neq 90^0$. В этом случае практически $j < 90^0$.

Тогда

$$(\cos^2 j - 2 \sin^2 j) = 0,$$

$$1 - 2 \operatorname{tg}^2 j = 0,$$

$$j = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right) = 35^\circ.$$

Тогда угол обваловки грунта траншейных зарядов ВВ равен:

$$j = 35^\circ.$$

Таким образом, на основании теоретических исследований [111] нами установлен угол обваловки грунта траншейных зарядов ВВ, при котором объем выброса достигает максимальной величины.

3.4. Исследование разлета грунтового потока, создаваемого взрывом линейного заряда выброса

Существующие методы определения параметров разлета грунтового потока взрывами на выброс базируются на теоретических предпосылках [9,37,92-94], на обобщении результатов экспериментальных наблюдений и данных производственного опыта [34,35].

Известные формулы для расчета параметров разлета грунтового потока взрывами на выброс дают существенный разброс, что свидетельствует о наличии ряда факторов, не учитываемых этими формулами. Самым главным, не учитываемым фактором, является обваловка грунта траншейных зарядов ВВ, увеличивающая глубину заложения заряда.

Рассмотрим определение параметров разлета грунтового потока взрывами на выброс из следующих допущений:

1. Частицы грунта испытывают при своем движении действие сил сопротивления воздуха. При этом степень торможения определяется

соотношением линейных размеров кусков, их объемной массой и скоростью движения.

2. Сила сопротивления воздуха выражается известной в аэродинамике квадратичной зависимостью [35]:

$$F_{\text{с}} = c_{\text{л}} S_{\text{м}} \frac{\rho_{\text{в}} J^2}{2g}, \quad (3.29)$$

где $c_{\text{л}}$ – коэффициент лобового сопротивления;

$S_{\text{м}}$ – площадь миделевого сечения куска грунта, перпендикулярного вектору скорости;

J – скорость бросания грунтового потока;

g – ускорение силы тяжести;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха.

3. Отдельно летящие частицы грунта в воздухе, забрасываемые на максимальную дальность, не взаимодействуют между собой. При этом вектор силы сопротивления воздуха совпадает по величине с вектором скорости и направлен в противоположную сторону.
4. Открытая поверхность взрываемого массива горизонтальна, а вектор максимальной начальной скорости полета куска направлен по ЛНС.

Ускорение силы сопротивления воздуха $j_{\text{с}}$ получим, если правую и левую части этой зависимости разделим на массу куска породы M :

$$j_{\text{с}} = b_{\text{с}} \cdot J^2, \quad (3.30)$$

где $b_{\text{с}}$ – коэффициент сопротивления воздуха:

$$b_{\text{с}} = \frac{c_{\text{л}} \rho_{\text{в}} \cdot S_{\text{м}}}{2M}. \quad (3.31)$$

Коэффициент сопротивления воздуха зависит от формы и массы куска.

Условимся в качестве среднего размера куска считать размер ребра куба с объемом, равновеликим объему параллелепипеда, который описывает данный кусок грунта.

Согласно исследованиям, выполненным в работе [112], наиболее вероятной формой куска породы является такая, при которой отношение ее трех размеров выражается пропорцией:

$$a:b:c=1,6:1,0:0,6$$

Так как фактический объем куска примерно в 2,2 раза меньше объема описанного параллелепипеда, то

$$X_k = 1,3 \cdot \sqrt[3]{V_k}, \quad (3.32)$$

где V_k – фактический объем грунта.

При движении частиц грунт совершает движение беспорядочным образом. В качестве среднего значения площадь миделевого сечения, согласно исследованиям [112], можно принять

$$S_k = 0,6 X_k^2. \quad (3.33)$$

Масса куска грунта, исходя из отмеченных выше законов кусковатости, выражается зависимостью:

$$M = \frac{X_k^3 r}{2,2}, \quad (3.34)$$

тогда

$$\frac{M}{S_{\kappa}} = \frac{X_{\kappa} r}{1,3} \quad (3.35)$$

Подставляя это отношение в формулу (3.31) находим:

$$b_c = 0,65 \frac{C_{\text{л}}}{X_{\kappa}} \cdot \frac{r_{\text{в}}}{r} \quad (3.36)$$

Коэффициент лобового сопротивления для кусков различной формы колеблется от 1,2 до 1,8 [113]. Можно принять среднее значение $C_{\text{л}} = 1,5$; $\rho_{\text{в}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$. Поставив их в формулу (3.36), получим

$$b_c = \frac{1,3}{X_{\kappa} r}, \text{ м}^{-1}. \quad (3.37)$$

Уравнение движения куска грунта в векторной форме имеет вид:

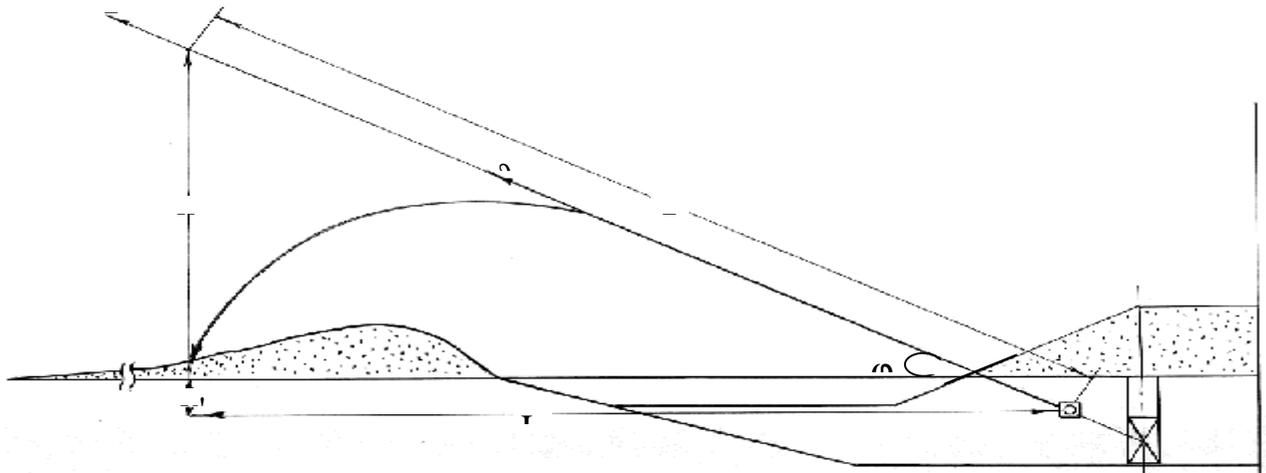
$$\frac{\partial \dot{\mathbf{J}}}{\partial t} = -b_c |\dot{\mathbf{J}}| \dot{\mathbf{J}} + g, \quad (3.38)$$

где $\dot{\mathbf{J}}$ - скорость движения, м/с;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

t – время, с.

Уравнение решается в прямоугольной системе координат. Ось $-y$ направлена вертикально вверх, ось $-x$ по горизонту. Начало координат помещаем в центр тяжести рассматриваемого объема выбрасываемого грунта, согласно рис.3.3.



**Рис-3.3. Схема определения кинематических параметров движения
грунтового потока при взрыве обвалованного грунтом линейных зарядов
выброса.**

Проектируя вектор уравнения (3.38) на оси $-ox$ и $-oy$, обозначая составляющие скорости по этим осям $-J_x$ и J_y соответственно и присоединяя к уравнениям движения две кинематические зависимости, получаем систему:

$$\begin{cases} \frac{dJ_x}{dt} = -b_c J_x J \\ \frac{dJ_y}{dt} = -b_c J_y J - g \\ \frac{dx}{dt} = J_x; \quad \frac{dy}{dt} = J_y \end{cases} \quad (3.39)$$

где $J = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$.

Начальным условием интегрирования будут при $t=0$:

$$J_x = J_0 \cos a; \quad J_y = J_0 \sin a; \quad x = 0; \quad y = 0,$$

где α - угол, составляющий вектор скорости с горизонтом;

J_0 - начальная скорость бросания грунтового потока, м/с.

Начальная скорость бросания грунтового потока определяется из закона сохранения энергии и определяется по формуле:

$$J_0 = \sqrt{\frac{2hqQ}{r}}, \text{ м/с}, \quad (3.40)$$

где $\eta=0,05$ – коэффициент полезного действия взрыва на выброс;

q – удельный расход ВВ, кг/м³;

Q – удельная теплота взрыва, Дж/кг;

ρ - плотность грунта, кг/м³.

Анализ, проведенный в работе [114], показал, что уравнения систем (3.39) зависят друг от друга.

Будем считать, что также, как и в пустоте, частицы грунта при движении в воздухе совершат два независимых движения:

- по направлению вектора начальной скорости;
- по направлению силы тяжести.

В том и другом случае на него действует сила сопротивления воздуха, величина которой соответствует составляющим скорости по этим направлениям [114].

Система уравнений, решения которых прилагаются в приложении 2, принимает следующий вид:

$$\begin{cases} x = J_0 t \cdot \cos j - \frac{b_c J_0^2 t^2}{2} \cos j ; \\ y = J_0 t \cdot \sin j - (b_c J_0^2 \sin j + g) \frac{t^2}{2}; \end{cases} \quad (3.41)$$

где x – координатная ось по направлению дальности бросания
грунтового потока равная - L ;

y – координатная ось по вектору силы тяжести.

При $y = 0$ вторая формула из системы уравнений (3.41) принимает вид:

$$t \left(J_0 \sin j - (b_c J_0^2 \sin j + g) \frac{t}{2} \right) = 0. \quad (3.42)$$

Полученная формула имеет два решения:

$$t_1 = 0, \quad (3.43)$$

$$t_2 = t = \frac{2J_0 \sin j}{b_c J_0^2 \sin j + g}. \quad (3.44)$$

Найдем формулу расчёта времени бросания грунтового потока.

Первая формула из системы уравнений определяет дальность бросания
грунтового потока:

$$L = J_0 t \cos j - \frac{b_c J_0^2 t^2}{2} \cos j. \quad (3.45)$$

Подставляя начальную скорость бросания грунтового потока, получим
окончательную формулу в виде:

$$L = \sqrt{\frac{2hqQ}{r}} \left(1 - \frac{b_c \cdot t}{2} \sqrt{\frac{2hqQ}{r}} \right) t \cos j. \quad (3.46)$$

В результате теоретических исследований [115,116] полученные
формулы (3.41) дальности бросания и высоты подъема грунтового потока от
времени бросания характеризуют зависимости, которые приведены на рис.3.4.

Полученные зависимости показывают, что высота подъема грунтового
потока от времени бросания характеризуется зависимостью параболического
типа. Анализ полученных графиков показывает, что через 2,3 с высота подъема

грунтового потока достигает максимального значения 36,5 м. При этом весь процесс бросания заканчивается за 4,55 с.

Исследованиями установлено, что дальность бросания грунтового потока находится в параболической зависимости от времени, а с ростом времени дальность бросания грунтового потока возрастает, зависимость которой приведена на рис.3.4.

В результате экспериментальных исследований получены зависимости дальности бросания грунтового потока от угла обваловки линейных зарядов грунтом и удельного расхода, а также плотности взрывааемого грунтового массива, которые показаны на рис.3.5.

С увеличением угла обваловки траншейных зарядов грунтом дальность бросания грунтового потока снижается. Так, например, при углах обваловки 30° и 60° дальность бросания грунтового потока составляет соответственно 175 и 100 м.

Полученные зависимости (рис.3.5) показывают, что с ростом удельного расхода $ВВ$ от 2 до 4 $кг/м^3$ дальность бросания грунтового

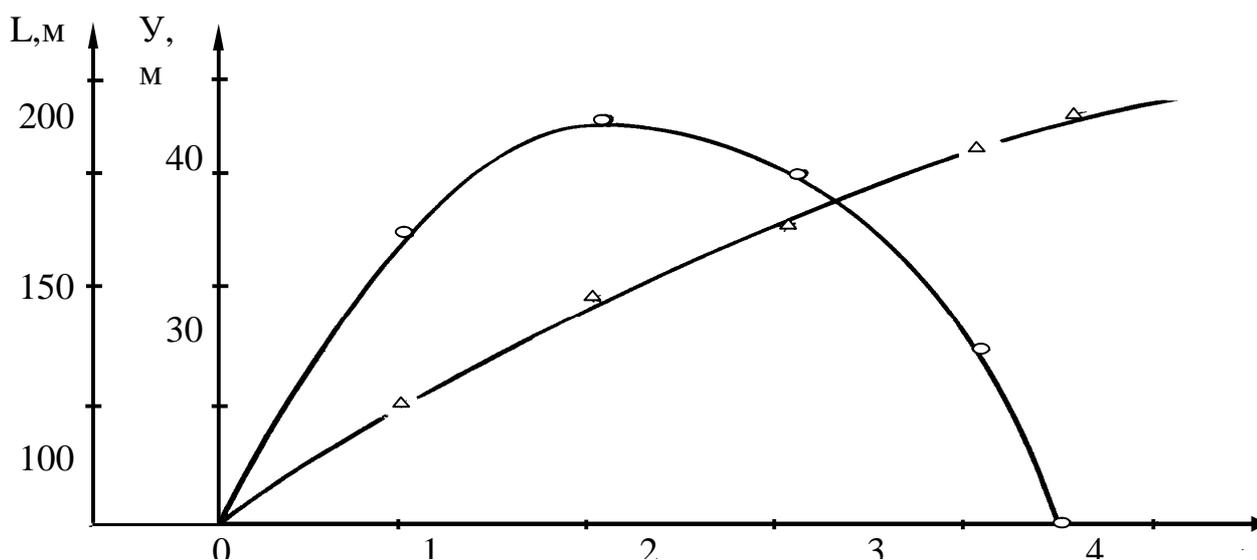


Рис.3.4. Дальность бросания и высота подъема грунтового потока в зависимости от их времени бросания соответственно:

- высота подъема и - дальность бросания грунтового потока.

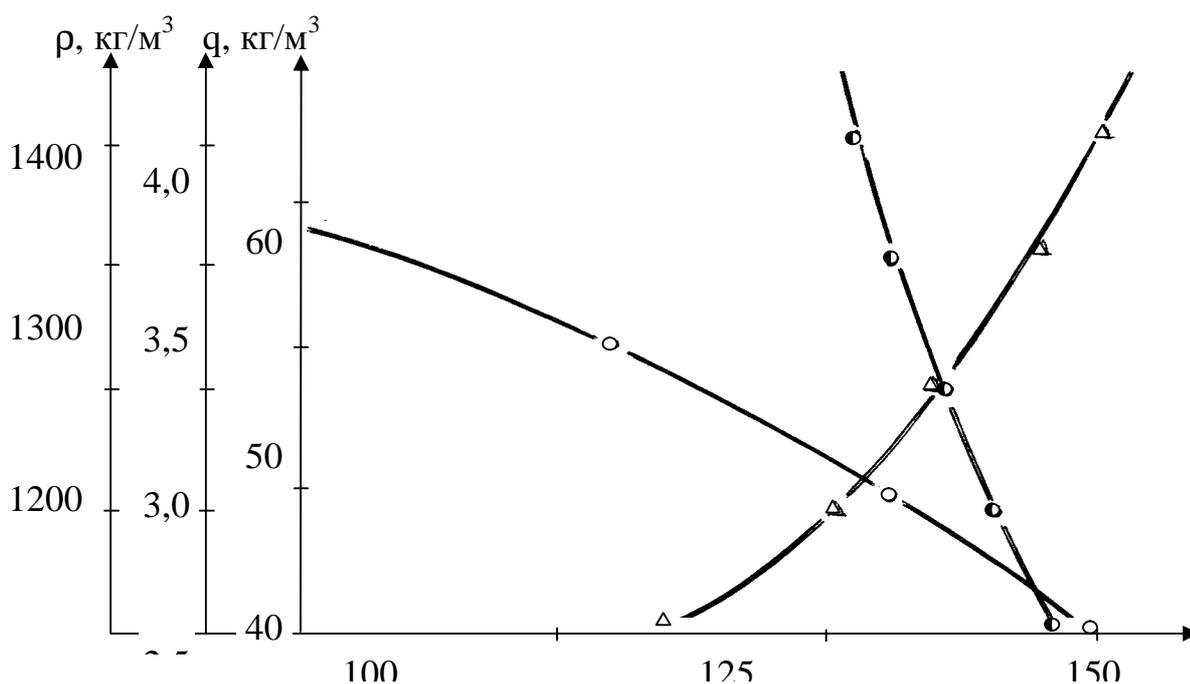


Рис.3.5. Дальность бросания грунтового потока в зависимости от угла обваловки линейных зарядов выброса грунтом, удельного расхода, а также плотности грунтового массива соответственно:

○ - угол обваловки грунта; Δ - плотность массива; ● - удельный расход ВВ.

потока возрастает и составляет соответственно 140 и 175 м. Начальная скорость бросания грунтового потока также возрастает и составляет соответственно 45 м/с и 64 м/с.

Полученные зависимости также показывают, что с увеличением плотности взрываемого грунтового массива от 1000 до 1400 кг/м³, дальность бросания грунта уменьшается и составляет соответственно 170 и 153 м, а начальная скорость бросания грунтового потока снижается соответственно до 61 и 52 м/с.

В результате теоретических исследований получены формулы для расчета дальности бросания и высоты подъема грунтового потока от времени бросания с учетом угла направления разлета движущейся грунтовой массы за счет обваловки грунтом линейных зарядов ВВ.

Выводы по главе 3.

1. Разработана математическая модель, описывающая действие обвалованного грунтом линейных зарядов выброса в грунтовом массиве.
2. Определены размеры обваловки грунтом траншейных зарядов ВВ, зависящие от угла откоса грунта и расстояния от оси выемки до точки пересечения поверхности обваловки с горизонтом выемки. Доказано, что при угле обваловки грунта равной 35° объем выброса из профильного сечения выемки достигает максимального значения.
3. Установлена обобщающая закономерность, описывающая взаимосвязь дальности разлета грунтового потока от начальной скорости и времени бросания, а также коэффициента сопротивления воздуха. Указанная зависимость отличается тем, что в ней учтен угол бросания грунтового потока путем управления направлением выброса за счет обваловкой грунтом траншейных зарядов ВВ. Доказано, что угол бросания грунтового потока находится в прямой зависимости от угла обваловки грунтом траншейных зарядов выброса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации дано новое решение актуальной научной задачи – по определению основных параметров навала грунта на основе изучения динамики взрыва траншейных зарядов выброса для повышения их эффективности открытых горных работах.

Основные научные выводы и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлены зависимости изменения максимального давления во фронте ударной волны от расстояния до места взрыва и массы заряда, а также изменения времени действия максимального давления во фронте ударной волны от удельного импульса давления в различных песчаных грунтах. Увеличение содержания воздуха в песчаном грунте приводит к уменьшению максимального давления во фронте ударной волны и снижению удельного импульса давления.
2. На основе изучения законов газодинамики исследовано развитие газовой полости заглубленного линейного заряда выброса при образовании удлиненных выемок в песчаных грунтах, на основе которого разработана математическая модель, описывающая действие обвалованного грунтом линейных зарядов выброса в грунтовом массиве.
3. Установлено, что скорость движения грунтового потока при взрыве линейных зарядов выброса максимальна по фактической ЛНС, а угол направления ее равен углу грунтовой обваловки линейных зарядов выброса. При угле грунтовой обваловки равной 35° , объем выброса достигается максимальной величины.

Установлена обобщающая закономерность, описывающая взаимосвязь дальности разлета грунтового потока от начальной скорости и времени бросания, а также коэффициента сопротивления воздуха. Указанная зависимость отличается тем, что в ней учтен угол бросания грунтового потока путем управления направлением выброса за счет обваловкой грунтом

траншейных зарядов ВВ. Доказано, что угол бросания грунтового потока находится в прямой зависимости от угла обваловки грунтом траншейных зарядов выброса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покровский Г.И. Взрыв. М., 1973. 182 с.
2. Родионов В.Н., Адушкин В.В. и др. Механический эффект подземного взрыва. М.: Наука, 1976. 285 с.
3. Покровский Г.И., Черниговский А.А. Расчет зарядов при массовых взрывах на выброс. М.: Госгортехиздат, 1963. 86 с.
4. Докучаев М.М., Родионов В.М., Ромашов Л.Н. Взрыв на сброс. М.: Изд. АН СССР, 1963. 108 с.
5. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М.: Недра, 1974. 224 с.
6. Суханов А.Ф., Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. М.: Недра, 1983. 344 с.
7. Кошелев Э.А. Тепловое поле подземного взрыва. В кн.: “Использование взрыва в народном хозяйстве”. Киев: Наукова думка, 1970.
8. Родионов В.А., Сизов И.А., Цветков В.Н. Исследование развития полости при камуфлетном взрыве. В кн.: “Взрывное дело” №64/21. М.: Недра, 1963.
9. Адушкин В.В. Влияние плотности и влажности песчаного грунта на размеры котловой полости при камуфлетном взрыве. ФГВ, 1979. №3. С. 107-116.
10. Ляхов Г.М. Ударные волны в грунте и разжижение в водонасыщенном песке. //Прикладная механика и техническая физика, 1961. №1. С. 5-10.
11. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974. 192 с.
12. Дорфман А.А., Левин Б.В. Научные сообщения. Выпуск 230. М. ИГД им.А.А.Скочинского, 1984. С. 66-72.
13. Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Гуров Н.Ф., Контор В.Х. Нормативный справочник по буровзрывным работам. 5-е издание. М., 1986. 511 с.
14. Черниговский А.А. Метод плоских систем зарядов в горном деле и строительстве. М.: Недра, 1971. 243 с.

15. Huges T.J.R., Liu W.K., Brooks A. Finite Element Analysis of Incompressible Viscous Flows by the Penalty Function Formulation //J. of Computational Physics, 1979. P. 1-60.
16. Lashari M. Strees, Vibration, Buckling, Dynamics and Heat Transfer Analysis. Cosmos/M User Guide-Structural Research and Analysis Corporation, Santa Monica, USA, 1989.
17. Гужов Н.А., Коротков П.Ф. Расчет взрыва на выброс при лучевом приближении. //Прикладная механика и техническая физика, 1975, №6. С. 77-86.
18. Марченко Л.Н., Жариков И.Ф. Влияние распространения волны сжатия на процесс выброса грунта. В кн.: Взрывное дело №81/38, М., 1989. С 90-94.
19. Черниговский А.А. О разлете грунта при взрыве на выброс. М. //Горный журнал, 1957. №4. С. 42-43.
20. Черниговский А.А. Внешняя балластика и дробление породы при взрыве на выброс и сброс. В кн.: Взрывное дело, №69/27, М., 1970. С. 66-78.
21. Лаврентьев М.А., Кузнецов В.М., Шер Е.Н. О направленном выбросе грунта при помощи ВВ. //Прикладная механика и техническая физика, 1960. №4. С. 49-50.
22. Вовк А.А., Черный Г.И., Кравец В.Г. Действие взрыва в грунтах. Киев: Наукова думка, 1974. 208 с.
23. Страусман Р.Я. Анализ взрывов на выброс. В кн.: Взрывное дело, №61/18, М.: Недра, 1966. С. 175-187.
24. Кушнарев Д.М. Использование энергии взрыва в строительстве. М.: Стройиздат, 1973. С. 279-281.
25. Кушнарев Д.М., Беликов М.П. Взрывные работы в гидромелиоративном и сельском строительстве. М.: Стройиздат, 1972. 224 с.
26. Кушнарев Д.М., Коган В.Л., Хазанов В.Г. Исследования поточно-механизированной технологии взрывных работ при строительстве каналов

- в пластичных грунтах. В кн.: Взрывное дело, №74/31. М.: Недра, 1974. С. 304-307.
27. Давыдов С.А., Кузнецов В.А. Взрывание на выброс траншейными зарядами. В кн.: Взрывное дело, №69/26. М.: Недра, 1970. С. 36-39.
 28. Кушнарев Д.М. Исследования строительства мелиоративных каналов взрывами непрерывных горизонтальных зарядов. –В кн.: Использование взрыва в народном хозяйстве. Ч.3. Киев: Наукова думка, 1970. С. 46-48.
 29. Вовк А.А., Андреев Ю.П., Кравец В.Г., Постнов В.В. Опыт применения траншейных зарядов игданита для образования открытых выемок. В кн.: Взрывное дело, №74/31. М.: Недра, 1974. С. 298-304.
 30. Баранов Е.Г., Данчев П.С., Иванов К.И. и др. Исследование процессов бурения и взрывания. М.: Углетехиздат, 1959. 117 с.
 31. Наумов Е.Ф., Сухотин А.П. Изучение движения среды вблизи очага взрыва оптическим методом. В кн.: Взрывное дело, №83/40. М.: Недра, 1982. С. 61-67.
 32. Адушкин В.В., Либин В.А., Перник Л.Н. Аналоговая установка для исследования групповых взрывов на выброс. В кн.: Взрывное дело, №83/40. М.: Недра, 1982. С. 36-44.
 33. Сухотин А.П. Применение жидкостных измерителей скорости при взрывах на выброс и сброс. В кн.: Взрывное дело, №83/40. М.: Недра, 1982. С. 80-85.
 34. Покровский Г.И., Федоров И.С. Возведение гидротехнических земляных сооружений направленным взрывом. М.: Стройиздат, 1971. 285 с.
 35. Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Блейман И.Л. Производство массовых взрывов. М.: Недра, 1977. 312 с.
 36. Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: Недра, 1972. 319 с.
 37. Адушкин В.В. Исследование взрывов на выброс линейными зарядами. ФТПРПИ, 1980, №5. С. 54-69.

38. Цурик В.А. Влияние влажности на размеры выемок при взрыве линейно-протяженного заряда в песке. В кн.: Взрывное дело, №88/45, М.: Недра, 1986. С. 89-92.
39. Зельманов И.Л., Кальков О.С., Тихомиров А.М. и др. Влияние газообразующих веществ в очаге электровзрыва и движения слабосвязанного грунта. ДАН СССР, 1968, №1. С. 90-93.
40. Зельманов И.Л., Канунов А.И. Влияние теплофизических свойств среды в очаге электровзрыва на параметры воронки выброса. ПМТФ, №2. 1969. С. 73-76.
41. Казанцев С.П., Цурик В.А., Задерен Л.А. и др. В кн.: Взрывные работы в грунтах и горных породах. Киев: Наукова думка, 1984. С. 102-105.
42. Цурик В.А., Тулупов В.К. Эффективность использования энергии взрыва при строительстве каналов в Астраханской области. В кн.: Взрывное дело, №88/45. М.: Недра, 1986. С. 143-150.
43. Печерога П.С. Параметры области влияния взрыва линейно-протяженных зарядов выброса в водонасыщенном грунтовом массиве. В кн.: Взрывное дело, №88/45. М.: Недра, 1986. С. 135-139.
44. Медведев Л.А., Пасечник В.Д., Букур Г.В. Эффективность взрывных работ при строительстве выемок в грунтах без применения землеройной техники. В кн.: Взрывное дело, №88/45. М.: Недра, 1986. С. 140-143.
45. Проект взрывания траншейными зарядами ВВ на выброс при строительстве коллекторно-дренажных сетей в Акватории Аральского моря в Муйнакском районе ККАССР. Ташкент: трест “Средазспецстрой”, 1987. 17 с.
46. Проект взрывания траншейными зарядами ВВ на выброс при строительстве коллекторно-дренажных сетей в Кунградском районе КАССР. Ташкент: трест “Средазспецстрой”, 1988. 15 с.

47. А.с. № 667086(СССР) Способ экскавации грунта взрывом. /Арутюнов А.А., Григорян С.С., Пьянков А.Г., Камалян Р.З., Бекавов И.Б. Опубл. в Б.И. 1979, №21.
48. Иванов П.Л. Уплотнение малосвязанных грунтов взрывами. М.: Недра, 1983. 230 с.
49. Ivanov P.L. Compaction of Cohesionless Soils by Explosives Proc. Of the YI Intern. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng., v.III, Monreal, 1965. P. 352-354.
50. Ivanov P.L., Krasnikov N.D. Charge Explosion Sounding of Saturated Cohesionless Soils. YI Simp. on Earthquake Eng., University of Roorkee, v.I, 1978. P. 151-156.
51. Ivanov P.L. Consolidation of Saturated Soils by Explosions. Intern. Conf. on Compaction, v.1, Paris, 1980. P. 331-337.
52. Donchef P. Compaction of loess by Saturation and Explasion inter. Conf. on Compaction, v.1, Paris, 1980. P. 313-317.
53. Klohn E.J., Garga V.K., Shukin W. Densitication of Sanol Tailings by Blasting. Prac. of the X inter. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng., v.3, Stockholm, 1981. P. 725-730.
54. Liman A.K.B. Compaction of Cohesionless Foundation Soils by Explosives. Trans. ASCE, v.107, Paper N2160, 1942. P. 1330-1345.
55. Prugh B.I. Densification of Soils by Explosive Vibrations. Proc. of the ASCE, v.89, March, N C01, 1963. P. 79-100.
56. Simon A. Comparasion de l'efficacite de trois proce'de's de compactage en grande l'paisseur sur un remblai hydraulique. Colloque Inter.sur le Compactage, v.1, Paris, 1980. P. 363-368.
57. Вовк А.А., Черный Г.И., Кравец В.Г., Пржеседский А.П. Применение взрывного способа уплотнения грунтов при строительстве оросительных каналов. //Гидротехника и мелиорация, 1969. №7. С. 26-31.
58. Кушнарёв Д.М., Патрашев А.Н. Новая поточная технология буровзрывных работ в гидромелиоративном и водохозяйственном строительстве. М.:

Центральная лаборатория мелиоративных и гидровзрывных исследований
СевНИГиМа, 1971. 9 с.

