

6
А-63

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УЗБЕКСКОЙ ССР

ТАШКЕНТСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Горный инженер ЗАХАРЧЕНКО В.Н.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВОМ ОДИНОЧНОГО ЗАРЯДА

05.311. Подземная разработка и эксплуатация
угольных, рудных и нерудных месторождений

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ташкент - 1970 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УЗБЕКСКОЙ ССР

ТАШКЕНТСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Горный инженер ЗАХАРЧЕНКО В.Н.

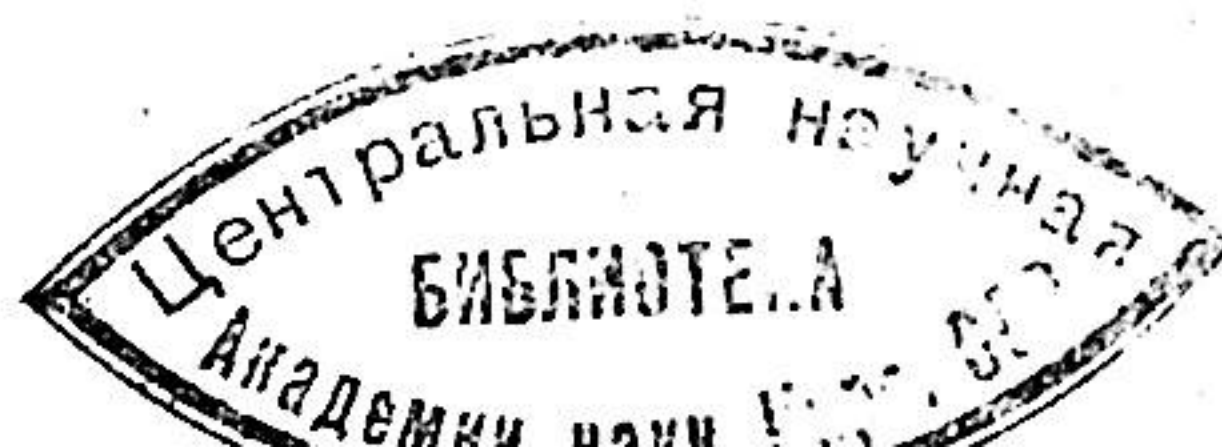
АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВОМ ОДИНОЧНОГО ЗАРЯДА

05.311. Подземная разработка и эксплуатация
угольных, рудных и нерудных месторождений

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ташкент - 1970 г.



В В Е Д Е Н И Е

Взрыв — одно из весьма сложных явлений неорганической природы, характерной особенностью которого является большое разнообразие его результатов. Это затрудняет создание как теории разрушения горных пород в целом, так и отдельных положений о действии взрыва.

Трудность учета всех факторов при механическом действии взрыва, невозможность непосредственного наблюдения за его развитием, искажение результатов последующими явлениями остаются до настоящего времени главной причиной недостаточной изученности взрыва как физического процесса.

Формирование зоны разрушения среды, зависимости ее формы и размеров от условий взрывания, свойств ВВ и взрываемых сред — одно из фундаментальных, но до сих пор не изученных положений действия взрыва в горных породах.

До настоящего времени исследователи, на основе наблюдения, принимали формы зон разрушения в качестве тех или иных правильных геометрических форм. Практика же взрывных работ свидетельствует о сложных и разнообразных формах зон разрушения, значительно отличающихся от принятых.

Эмпирический метод, широко распространенный при изучении взрыва, не дает возможности вскрыть общие закономерности формирования зон разрушения. Необходимо изменение методики исследования, изыскание метода, позволяющего вскрыть развитие процесса. Таким методом должны стать аналитические исследования. Лабораторная и промышленная практика располагают достаточно обширными данными о действии взрыва в различных условиях, что и может быть основой построения принципиальной схемы развития взрыва и математического описания его.

Данная работа посвящена определению форм зон разрушения одиночного заряда аналитическим методом на основе математического описания теоретических положений о механическом действии взрыва в горных породах.

Работа изложена на 124 страницах машинописного текста с 52 рис. и 9 таблицами; состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы.

ГЛАВА I. ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Необходимость определения форм зон разрушения горных пород взрывом исторически возникла в связи с необходимостью расчета величины заряда ВВ.

Исследователи, занимающиеся этим вопросом, принимали форму зон разрушения, исходя из данных, полученных при определении и замерах воронок взрыва в различных изучаемых условиях. Отсутствие теоретического обоснования приводило к различной оценке получаемых результатов.

Для сосредоточенного заряда иностранные исследователи принимали форму воронки взрыва в качестве правильной геометрической фигуры (конус, усеченный конус, параболоид или сфероид вращения и т.д.). Русские инженеры М.М.Фролов и М.М.Боресков установили, что воронка выброса имеет сложную форму, не отвечающую ни одной из перечисленных выше. Кроме того, в зависимости от величины заряда, форма ее изменяется.

Для колонкового заряда при двух обнаженных поверхностях в настоящее время принимаются: клин с треугольным сечением, цилиндр с круглым или корытообразным сечением.

Главными задачами управления взрывом является получение необходимых профилей разрушения и кондиционных фракций крупности.

Исследование количественных характеристик разруше-

ния, т.е. степени дробления и объема выброса, требует знания области, в которой эти процессы происходят. Размеры зон разрушения определяют решение таких задач теории и практики взрывного дела, как зависимость результатов взрыва от величины заряда, его конструкции и условий взрывания, рациональные параметры буровзрывных работ и т.д. Но определение размеров зон разрушения невозможно без установления их формы. Следовательно, вопрос о форме зон разрушения по существу своему является одним из основных содержаний общей теории разрушения горных пород действием взрыва.

Горные породы характеризуются большими колебаниями количественных показателей физико-механических и структурных свойств. Временные сопротивления различным деформациям изменяются в десятки и даже сотни раз. Установлено, что они зависят и от размеров испытываемых образцов. Структурные свойства (пористость, трещиноватость и т.д.) измеряются относительными показателями, значения которых также колеблются в очень широких пределах.

В больших диапазонах изменяются и показатели свойств промышленных ВВ: бризантность до 300 %, работоспособность более 170 %, скорость детонации до 350 %, давление на фронте волны от 60.000 до 300.000 кг/см.

Взрыв является сложным процессом взаимодействия различного проявления энергии заряда (давление газов, волна напряжения) с многообразными свойствами взрываемых сред. Различные количественные соотношения величины и характера проявления энергии и прочностных характеристик окружающей среды, обусловленных ее свойствами и геометрией расположения заряда, определяют многозначность результатов действия взрыва, наблюдаемых в практике. Это порождает наличие многих, зачастую непохожих между собой, теоретических воззрений о механизме разрушения горных пород взрывом. Общепризнанная теория механического дейст-

вия взрыва в горных породах в настоящее время отсутствует.

Соответственно изложенному выше, задача данного исследования состоит в следующем: произвести определение форм зон разрушения горных пород для сосредоточенного и колонкового одиночных зарядов в неограниченном полупространстве с одной свободной поверхностью в плоскости, перпендикулярной границе раздела и проходящей через центр сосредоточенного заряда или ось сплошного колонкового заряда.

В практике взрывных работ одиночные заряды применяются редко. Однако, при изучении действия взрыва случай одиночного заряда играет основополагающую роль, т.к. является отправной позицией в изучении действия взрыва в сложных условиях: взрывов из серии зарядов, взрывов при нескольких обнаженных поверхностях.

ГЛАВА II. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Достоинством метода экспериментальных исследований, широко применяемого при изучении взрыва, является возможность непосредственной проверки принятых положений в ходе опыта, в его условиях. Наряду с этим, он обладает и существенным недостатком: результаты опыта и сделанные на основе их выводы справедливы только для данных конкретных условий опыта.

Попытки определения форм зон разрушения в широком диапазоне различных производственных условий встречают целый ряд естественных, вполне обоснованных трудностей. Лабораторные исследования, несмотря на определенные успехи, не могут охватить всего разнообразия тех условий, которые встречаются в практике промышленности и строительства. Применяемые в лаборатории материалы не полностью воспроизводят физико-механические и структурные

свойства горных пород. Картина явления, получаемая в лаборатории, может не соответствовать явлению в натуре. Безусловно, важную роль играет также и масштабный фактор.

Установление корреляционных зависимостей для освобождения от влияния случайностей требует постановки большого количества опытов в разнообразных условиях. Это потребует больших затрат материальных средств и времени. Экспериментальный метод становится громоздким и дорогостоящим.

Применительно к изучению форм зон разрушения экспериментальный метод не приемлем из-за невозможности непосредственного наблюдения за происходящими при взрыве явлениями. Наблюдатель видит не развитие процесса взрыва, а конечные результаты его. В воронке выброса после взрыва происходит оснивание ее стенок, возврат части взорванной массы, а следовательно, и искажение результатов первичного действия взрыва.

Математические методы в учении о взрыве, также как и в других науках о неорганической материи, применяются в следующих направлениях.

Первое. Математический аппарат используется для определения количественных характеристик уже известных из физики процессов, но протекающих в данных конкретных условиях: распространение волн в пространстве и времени, напряжений, создаваемых упругими волнами в различных средах, взаимодействия волн при короткозамедленном взрывании и т.д.

Второе. Проводятся математические аналогии между происходящими при взрыве явлениями и различными явлениями неорганической природы. При этом делаются определенные допущения.

Третье. Статистическая обработка результатов промышленной практики или экспериментальных данных. Этим методом получены известные в настоящее время формулы

по определению тех или иных параметров в инженерных целях (величина заряда, количество шпуров на забой). Однако, метод математической статистики, позволяя увидеть за случайными колебаниями только то или иное действие, не вскрывает причины этого действия, его физической сущности, в данном случае — механизма образования зон разрушения. По мере совершенствования взрывного дела расчетные формулы меняются; вносятся поправки в известные ранее, появляются новые. Методы же получения формул остаются прежними. Математические зависимости устанавливаются на основе экспериментов или обобщения опытов, и в этом случае не отражают физической сущности процесса разрушения.

Ограниченность условий применения полученных таким образом формул обязывает изыскивать новые пути подхода к изучению процесса механического разрушения горных пород взрывом.

А.В.Коваженков делает первую попытку определения формы зон разрушения одиночного колонкового заряда на основе анализа действия сил взрыва и создаваемых ими напряжений в массиве взрываемой среды. На основе лабораторных работ Л.И.Барона и В.Ф.Трумбачева, автор выводит уравнение кривой контура зоны разрушения в плоскости, перпендикулярной оси заряда. Выполненный аналитический расчет, однако, по всей его внешней строгости, содержит в себе несколько неверных допущений, что не позволяет считать его достоверным.

Большие трудности вызывает то обстоятельство, что определение форм зон разрушения является одним из общих вопросов теории разрушения горных пород взрывом. Решение его должно быть основано на общих закономерностях действия взрыва, т.е. «свойственных взрывам всех масштабов и при всех свойствах ВВ и взрываемых сред (при условии одной свободной поверхности)».

Лабораторной и промышленной практикой взрывных работ, произведенных в широком диапазоне физических условий, накоплен обширный материал, вскрывающий различные частные явления. Однако, разнообразие результатов и возникновение на этой основе различных гипотез не препятствует установлению общих закономерностей. Из всего разнообразия частных положений необходимо произвести отбор характерного, общего, свойственного взрыву вообще.

Накопившиеся факты ставят новые вопросы, решение которых требует и новой методологии. В этом случае аналитические исследования приобретают особо важное значение. Там, где нельзя развитие процесса установить опытным путем, математическая модель является единственно возможной. Аналитический метод здесь выступает как самостоятельный, вскрывающий те или иные закономерности процесса.

Необходимым условием применения аналитического метода должно быть установление некоторых основополагающих принципов, общих для взрывов любых масштабов и для любых условий, т.е. создание основ общей теории действия взрыва в горных породах.

Теория механического действия взрыва на первом этапе ее создания может быть изложена как качественная теория, формулирующая некоторые основные объективные положения и позволяющая произвести их математическое описание.

При однородной среде и однородном составе заряда ВВ, воздействие заряда на любую точку разрушаемой среды будет качественно одинаковым, идентичным всем остальным точкам данной среды. Различными будут лишь количественные соотношения этого воздействия в зависимости от расстояний данных точек до заряда и свободной поверхности, т.е. напряжений, обусловленных энер-

гией заряда и прочностью массива в данной точке.

Математическое описание поведения одной из точек среды под влиянием активных сил взрыва и реактивных сил сопротивления будет являться описанием поведения всей среды в целом. Различие конструкций заряда и геометрических условий заложения его приводят только к различным количественным распределениям энергии и напряжения в массиве. Физический принцип разрушения, характер взаимодействия заряда со средой остаются одинаковыми; качественная картина взрыва, механизм разрушения среды не изменяются.

Математическое описание действия взрыва становится возможным благодаря методу взрывного луча, предложенному проф. Г.И.Покровским, в соответствии с которым каждая точка однородной среды, окружающей заряд, будет испытывать действие взрывного луча в направлении, соединяющего заряд с данной точкой.

Критерием правильности результатов, полученных аналитически, является соответствие их результатам практики, а также возможность объяснения с этих позиций некоторых явлений, наблюдаемых при взрыве.

В соответствии с нашими исследованиями введем следующие понятия: воронка выброса — область действия взрыва, в пределах которой происходит дробление горных пород и сдвигание их относительно общего массива; зона дробления — область действия взрыва, в пределах которой происходит разрушение горных пород без их смещения относительно общего массива. Воронка выброса и зона дробления составляют зону разрушения. Термин "воронка" не означает конусообразной формы полости. Наряду с термином "форма" будем применять также термины "контур" и "профиль".

ГЛАВА III. КАЧЕСТВЕННАЯ СХЕМА МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Освободившаяся при взрыве заряда энергия проявляется в действии удара, вызывающего напряжения волнового характера и поршневого (квазистатического) давления газов. Массив горных пород, окружающий заряд ВВ при взрыве его, находится под сложным напряжением, создаваемым упругими волнами и давлением газообразных продуктов взрывчатого разложения.

Разрушение происходит как бы в два этапа. В непосредственной близости от заряда энергия упругих волн создает напряжения, превышающие временные сопротивления среды и среда разрушается. При удалении от заряда энергия упругих волн падает и оказывается недостаточной для разрушения, но вызывает напряжения, производящие упругие деформации. Создаются условия предразрушения. На следующем этапе происходит наложение напряжений от поршневого давления газов. Если предразрушение было достаточно интенсивным, а давление газов достаточно велико, оно завершает работу разрушения. Если суммарное действие упругих волн и давление газов ниже сопротивления пород, разрушение не происходит.

Работа, производимая зарядом ВВ в горных породах, проявляется в двух видах: разрушения и выброса. При значительной величине энергии заряда породы разрушаются (дробятся) и, кроме того, определенная часть энергии производит выброс разрушенных объемов. При условии равенства напряжений, создаваемых энергией заряда и напряжений, необходимых для разрушения, происходит разрушение без выброса.

В глубине массива разрушения носят местный характер. Основная работа разрушения совершается между зарядом и свободной поверхностью, благодаря меньшей

прочности массива в этом направлении, большей способности его деформироваться.

При движении волны напряжения в сторону свободной поверхности толщина слоя ненапряженного массива снижается, и когда упадет до значения, неспособного противостоят давлению газов, разрушается. Полость раскрывается. Газы прорываются в атмосферу, давление в зарядной камере падает. Напряжения, вызванные давлением газов, снимаются. Разрушение пород прекращается. Разрушенная порода под влиянием сил инерции или сдвигается или выбрасывается в зависимости от величины энергии, приобретенной при развитии процесса взрывчатого разложения.

Фронт волны напряжения — геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t_i , т.е. поверхность, проходящая через нулевую фазу, граница между возмущенной и невозмущенной средой. Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется волновой поверхностью. Разрушение будет происходить при прохождении волновой поверхности максимальных давлений. В случае ударной волны фронт волны и волновая поверхность максимальных давлений совпадают. Если изменение параметров упругой волны происходит не скачкообразно, волновая поверхность максимальных давлений будет отставать от фронта волны на определенное значение фазы волны.

При сосредоточенном заряде шаровой формы все точки поверхности заряда обладают одинаковыми свойствами. Фронт волны и любая из волновых поверхностей будут представлять концентрические шаровые поверхности с центром в середине заряда (месте расположения инициатора).

При мгновенном инициировании колонкового заряда цилиндрической формы, фронт волны также будет цилиндрическим. Напряжение в каждой точке поверхности за-

рядной полости суммируется от давлений, создаваемых всеми точками поверхности заряда. Против середины напряжения будет максимальным, на концах заряда — минимальным. Волновая поверхность максимальных давлений не совпадает с фронтом волны напряжений. Если заряд инициируется с одного конца, то при продвижении волны детонации будет образовываться группа волн. На любую из точек среды будут действовать волны, образующиеся в разных участках заряда, т.е. находящихся на различных расстояниях от данной точки. Каждая из точек окружающей заряд среды испытывает сложное воздействие волн, сдвинутых по фазам, а следовательно, и с различными количественными параметрами, меняющимися с течением времени. При центральном инициировании описанные явления происходят симметрично по одну и по другую стороны от инициатора. Поле волновых напряжений изменяет свои параметры в зависимости от продвижения волн в пространстве и изменения времени в данной точке.

Среда вокруг заряда ВВ при взрыве его претерпевает упругие или пластические деформации, соответственно чему существуют следующие зоны деформаций: пластической, упруго-пластической, упругой. Разрушение происходит во всех зонах деформаций. При различном поведении горных пород внутри зон деформаций, в пределах зоны разрушения, после наступления соответствующих деформаций, среда разрушается. Причиной разрушения является накопление необходимого количества энергии и создание напряжений, превышающих прочностные свойства пород.

Изменение плотности потока энергии и максимальных радиальных напряжений в зависимости от расстояния для сферического заряда происходит на экспоненте:

$$E = E_0 \cdot r^{-3}$$

Прямая волна напряжений при своем продвижении производит деформацию сжатия, характер которой (упругая, остаточная) зависит от величины создаваемых напряжений.

Слой горных пород, расположенных выше заряда, рассматриваем как плиту с динамической жесткостью:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

Разрушение горных пород, расположенных между зарядом и свободной поверхностью, происходит в случае, когда величина потока энергии превосходит величину динамической жесткости.

На рис. I представлены три характерных случая разрушения горных пород в зависимости от соотношения динамической жесткости (двойная линия) и величины потока энергии заряда ВВ (сплошные линии):

I. Разрушение производится прямой волной.

II. На расстоянии от заряда l_2 разрушение производится прямой волной. На расстоянии $l_3 - l_2$ разрушения нет. На участке далее l_3 - отраженной волной.

III. На длине l_0 разрушение прямой волной - происходит прострел.

В общем виде разрушающее действие взрыва:

$$M = kQE \quad (5) \text{ I/}$$

где: Q - величина заряда в весовых единицах,

E - энергия единицы заряда,

k - коэффициент использования энергии взрыва или коэффициент полезного действия взрыва.

I/ Номерация формул принята такой же как в диссертационной работе.

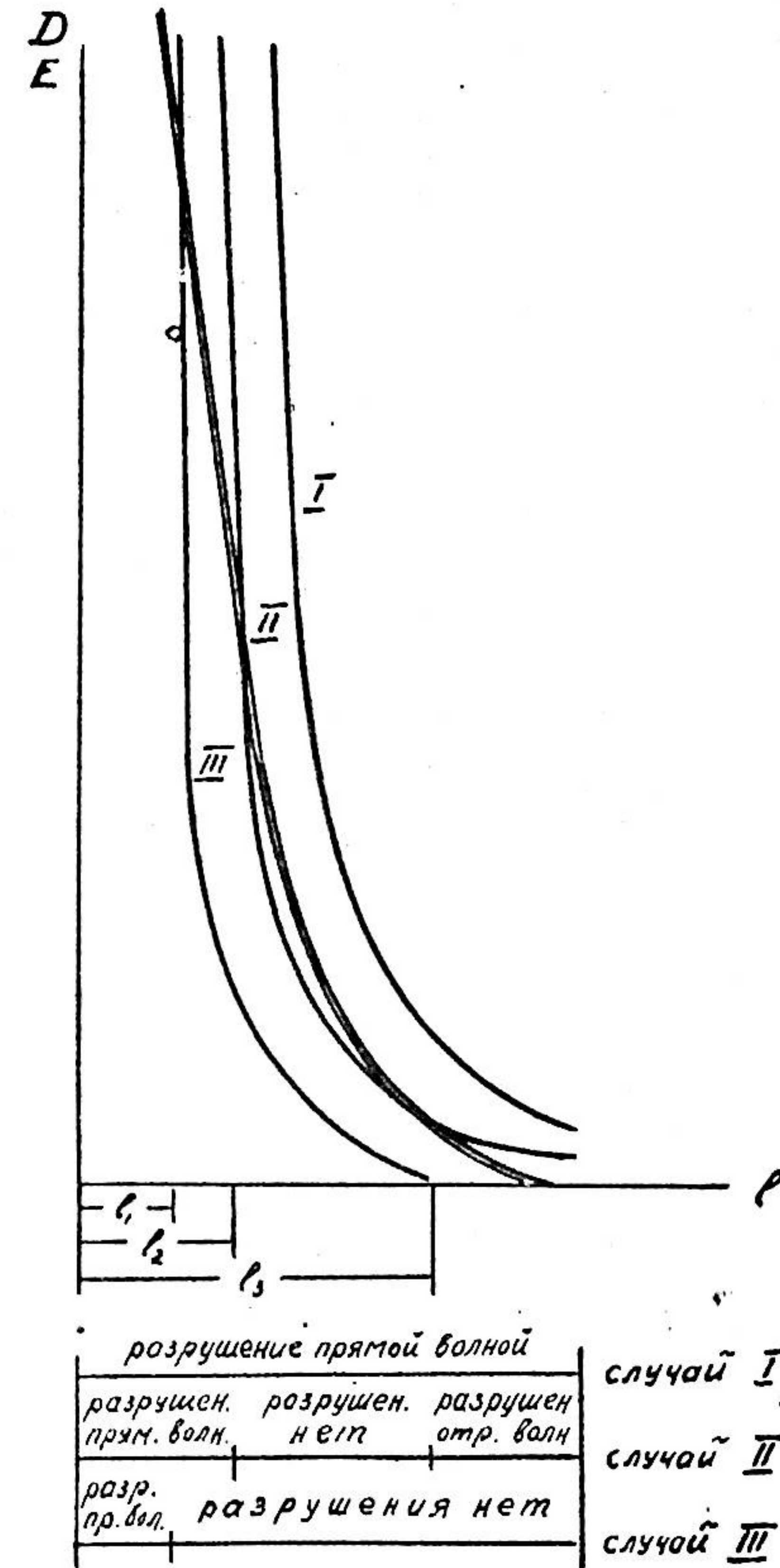


Рис. I. Взаимодействие энергии взрыва и динамической жесткости пород.

Из физики известна связь между потенциальной энергией и силой:

$$P = -grad E_p$$

Поскольку изменение величины энергии имеет волновой характер, то сила и создаваемое ею давление изменяются по той же зависимости.

Точное значение к.п.д. взрыва в настоящее время не определено. По литературным источникам величина его колеблется: при взрывах на выброс в пределах 0,01-0,07; при взрывах на рыхление 0,15-0,25.

Работа пропорциональна затраченной энергии. Применительно к механическому действию взрыва, к.п.д. будем считать как отношение энергии, затраченной на выполнение работы выброса и работы дробления к полной общей энергии заряда.

В первом приближении принимаем, что работа выброса пропорциональна объему разрушения, работа дробления — объему разрушения и степени дробления. При взрыве заряда на поверхности энергия заряда в основном расходуется на образование воздушной ударной волны, доля полезной работы близка к нулю. По мере углубления заложения заряда постоянной величины, доля полезной работы возрастает. При достаточно большой глубине заложения заряда образуется прострелочная полость. Доля полезной работы в этом случае достигает своего максимума, потери минимальны.

Коэффициент полезного действия взрыва является функцией отношения глубины заложения заряда к величине его.

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{H}{Q}\right)}$$

В соответствии с видами производимой работы целесообразно установить следующие понятия:

а) к.п.д. взрыва по выбросу $\eta_e = E_e : E_{0.5}$

б) к.п.д. взрыва по дроблению $\eta_d = E_d : E_{0.5}$

ГЛАВА III. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВОМ

Рассмотрим действие сосредоточенного заряда ВВ в однородной монолитной скальной среде с одной свободной поверхностью.

Сосредоточенный заряд расположен в начале полярных координат (рис. 2).

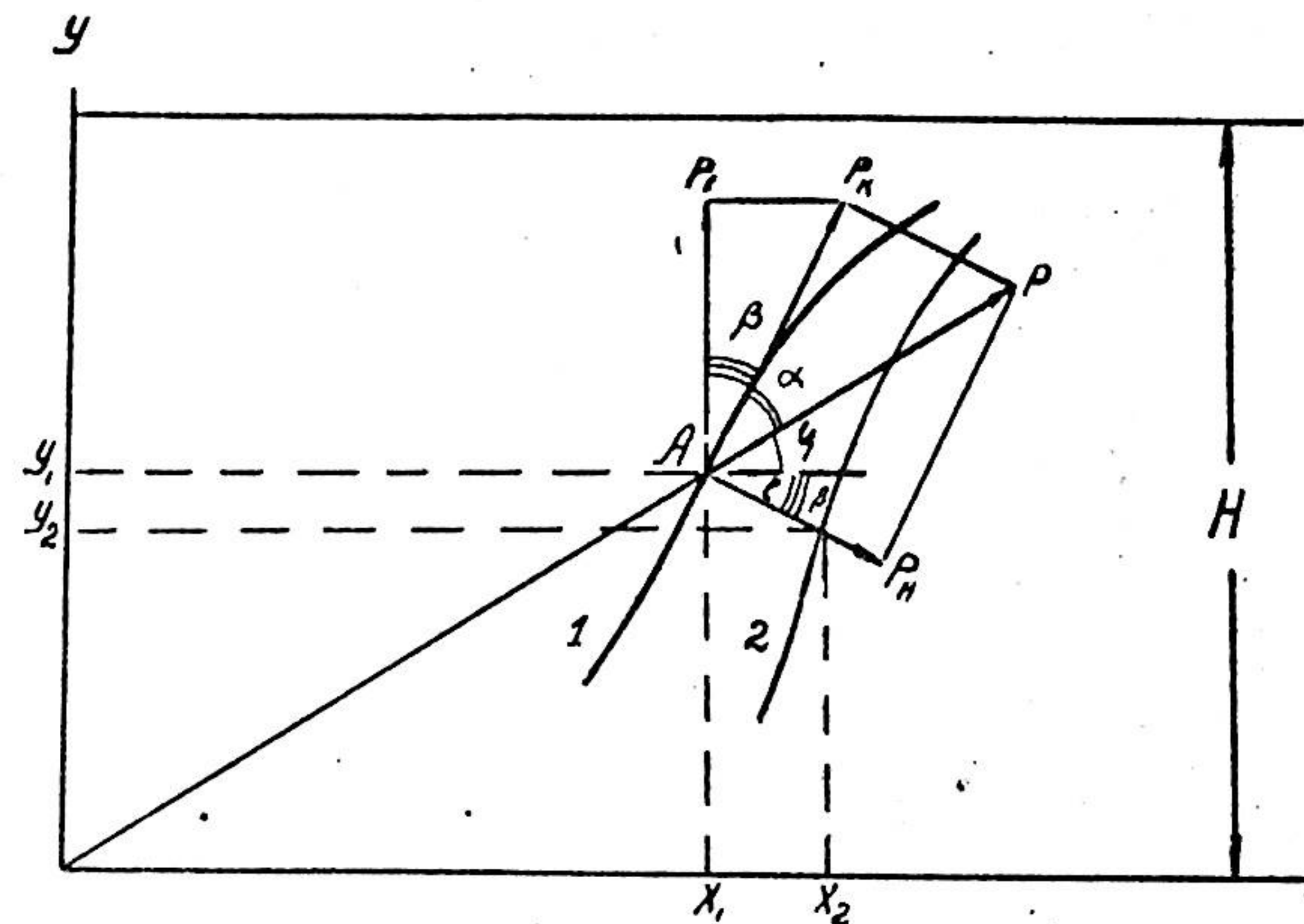


Рис. 2. Схема формирования воронки выброса и зоны дробления.

Точка А является произвольно выбранной точкой на граничной поверхности действия взрыва в твердой среде. Распространяясь радиально в виде шаровой сферы по на-

правлению от заряда, волна напряжений вызывает сжимающие напряжения. Кроме того, любая из точек разрушаемой среды находится под действием "подпора" газообразных продуктов.

Сила есть вектор. Направление силы P , приложенной к точке А будет радиальным от заряда. Плотность потока энергии и нормальные напряжения на фронте волны напряжения изменяются по следующей зависимости:

$$P \sim r^{-n}$$

где: r - расстояние от заряда.

В наших исследованиях будет принят $n = 3$.

Величина напряжения, создаваемого на поверхности "заряд - среда" при взрыве заряда зависит от величины заряда, свойств ВВ и взрывааемых горных пород.

Давление P , действующее в точке А, расположенной на контуре воронки выброса будет равно:

$$P = \frac{M}{r^3} \quad (6)$$

Контур воронки выброса является предельным контуром сдвижения горных пород. Опыт взрывных работ свидетельствует, что за пределом воронки выброса образуется зона разрушения, в пределах которой подвижки породы отсутствуют.

По энергетическому принципу, выдвинутому проф. Г.И.Покровским, разрушающее действие взрыва проявляется в давлении, прилагаемом к разрушаемой среде.

Давление на волновой поверхности в точке А поверхности воронки выброса создается силой P .

Разложим силу P на две составляющих:

P_{α} - направленную по касательной к контуру воронки выброса;

P_{β} - направленную по нормали к контуру воронки выброса.

Составляющая P_{α} формирует воронку выброса, составляющая P_{β} производит разрушение массива за пределами контура воронки выброса, т.е. формирует зону дробления.

Подъемная сила всегда направлена вертикально вверх.

Из чертежа $P_{\beta} = P_{\alpha} \cos \beta$, $P_{\alpha} = P \cos \alpha$

$$P_{\beta} = P \cos \alpha \cos \beta = \frac{M}{r^3} \cos \alpha \cos \beta$$

Величина подъемной силы P'_{β} , необходимой для выброса элементарного столба раздробленной породы выше точки А:

$$P'_{\beta} = (H - r \sin \varphi) \gamma \quad (7)$$

где: H - глубина заложения заряда,

γ - объемный вес пород.

В точке, лежащей внутри, контура воронки выброса давление сил взрыва превосходит величину подъемной силы, необходимой для выброса: $P_{\beta} > P'_{\beta}$

В точке, лежащей за контуром воронки взрыва давление будет недостаточным для выброса: $P_{\beta} < P'_{\beta}$

В точке, лежащей на контуре воронки, т.е. граничных условиях сдвижения горных пород, разрушенных взрывом: $P_{\beta} = P'_{\beta}$

Это и является условием образования контура воронки выброса.

Тогда:

$$\frac{M}{r^3} \cos \alpha \cos \beta = (H - r \sin \varphi) \gamma$$

Произведи преобразования и учитывая, что

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{dx}{dy} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}} = \frac{1}{y'}$$

получаем дифференциальное уравнение семейства кривых профиля воронки выброса

$$M(y + \frac{x}{y'}) = (H-y) \sqrt{(x^2+y^2) \left[1 + \frac{1}{(y')^2} \right]} \quad (8)$$

Действуя за пределами воронки выброса, P_n будет производить разрушение на расстоянии, при котором величина ее сравнивается с временным сопротивлением пород на раздавливание $P_n' = \sigma = P_n \cdot l^3$

Из чертежа: $P_n = P \cos(\varphi + \beta)$

Производя преобразования, получим уравнение кривой профиля зоны дробления в параметрической форме:

$$x_2 = x_1 + \frac{l_y}{\sqrt{(y')^2 + 1}}; \quad y_2 = y - \frac{l}{\sqrt{(y')^2 + 1}} \quad (11)$$

где: x_1 и y_1 - координаты точки на кривой воронки выброса.

Выведенные уравнения сложны для практического использования. Произведем некоторые допущения: разложим силы на фронте волны напряжения на вертикальную и горизонтальную составляющие

$$P_y = P \sin \varphi; \quad P_x = P \cos \varphi$$

Примем, что в этом случае воронка взрыва формируется вертикальной, а зона дробления - горизонтальной составляющей.

После математических преобразований получаем тригонометрические уравнения:

1) кривой профиля воронки выброса:

а) в полярной системе координат

$$\sin \varphi = \frac{H r^3}{M + r^3} \quad (12)$$

б) в прямоугольной системе координат

$$\sqrt{(x^2+y^2)^2} (H-y) = M y \quad (13)$$

2) кривой профиля зоны дробления

$$x_2 = x_1 + \sqrt[3]{\frac{M}{6P_x P_r}} (\sqrt[3]{P_r} - \sqrt[3]{6P_r}); \quad y_2 = y, \quad (15)$$

Характер изменения кривых, построенных по дифференциальным и тригонометрическим уравнениям одинаков. На рис. 3 представлены кривые профилей воронок выброса по тригонометрическим и дифференциальным уравнениям.

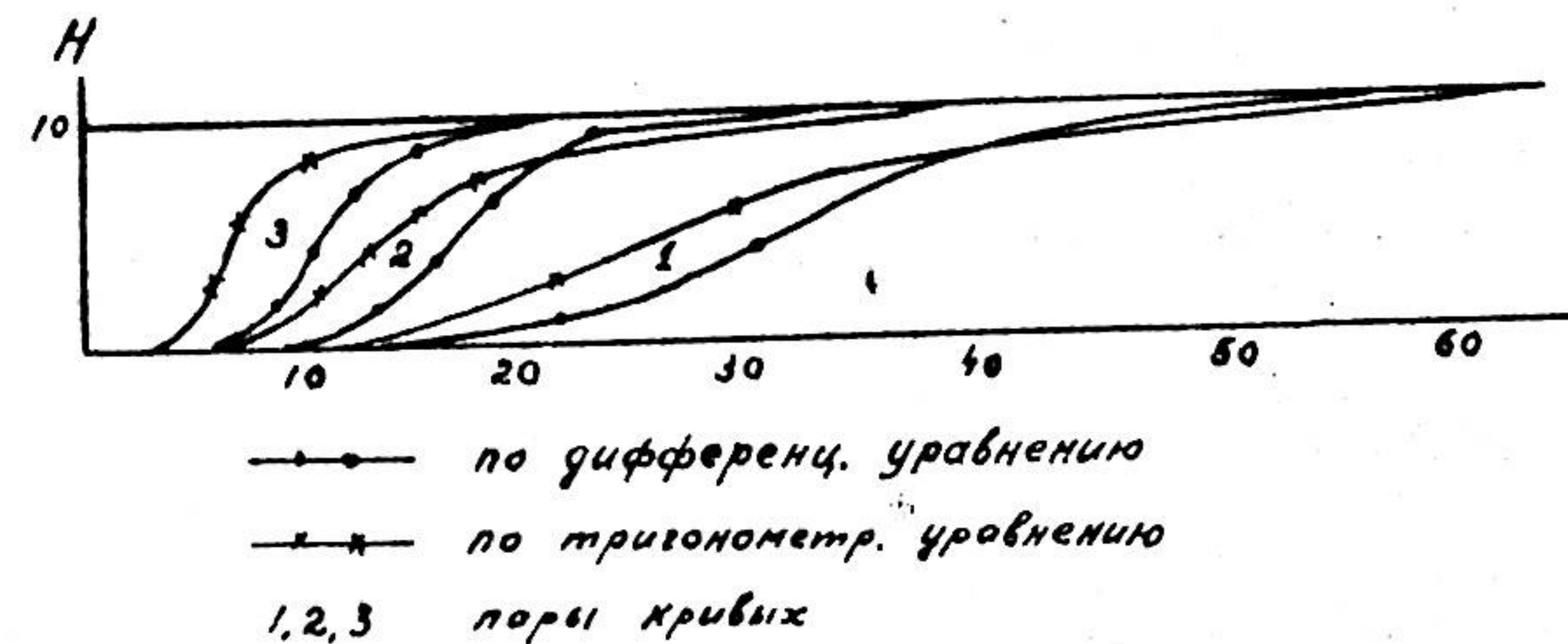


Рис. 3. Сравнение профилей воронок взрыва по дифференциальным и тригонометрическим уравнениям.

Контуры воронок взрыва и зон разрушения, построенных по дифференциальным и тригонометрическим уравнениям являются общими формами, которые в отдельных случаях при определенных условиях могут стать правильными геометрическими формами. Так, в зависимости от степени осыпания стенок и возврата грунта, воронка выброса может приобрести форму полусфероида, параболоида, усеченного или полного конусов. При небольших значениях M профили зон разрушения принимают сложные формы: котловая полость вокруг заряда и откольная

воронка у свободной поверхности.

Выведенные уравнения выражают общую связь, на основе которой возможно построение формулы объема воронки выброса в зависимости от энергии заряда (E), глубины его заложения (H) и объемного веса взрывааемых пород (γ).

Объем тела, образованного кривой при вращении ее вокруг оси OY :

$$V = \pi \int_{y_1}^{y_2} x^2 dy$$

С учетом условий взрыва, объем воронки выброса равен:

$$V = K \frac{\pi H (3\pi \sqrt{M} - 2H^2 \sqrt{\gamma})}{6 \sqrt{\gamma}} \quad (18)$$

где: $K = K_1 K_2 K_3$ - комплексный коэффициент, учитывающий свойства горных пород, геометрию заряда, полезное действие взрыва.

Коэффициенты K_1, K_2, K_3 могут быть установлены только экспериментально.

Достоверность зон разрушения, установленных теоретически, подтверждается опытами проф. А.Н.Ханукаева. На рис. 4 представлены профили зон разрушения, полученные опытным путем (сплошные линии) и профили, полученные аналитически (штрих-пунктирные линии).

Кроме того, с точки зрения установленных зависимостей возможно объяснение таких примеров и явлений, наблюдающихся в практике взрывных работ:

1. Профили поперечных сечений траншей, выполненных взрывным способом, совпадают с теоретическими.

2. Фактические формы воронок выброса при наклонных дневных поверхностях также совпадают с теоретическими.

3. Наблюдающиеся в практике различные направления разлета взорванной горной массы (цилиндрическое, кони-

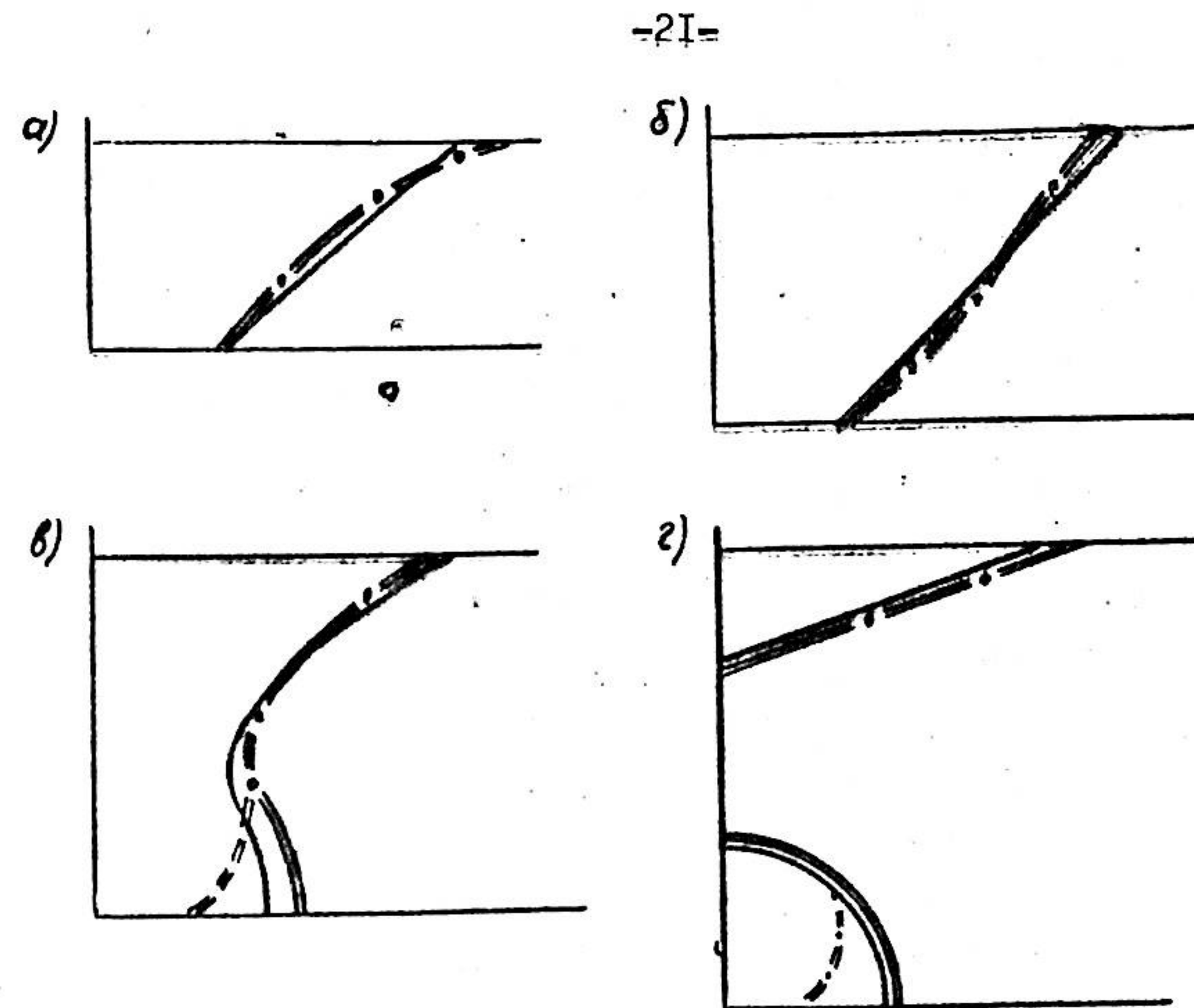


Рис. 4. Фактические и расчетные профили зон разрушения.

ческое с различным углом раствора) определяется углом наклона стенок воронки выброса, зависящих в свою очередь от величины заряда и глубины его заложения.

Для определения формы волновой поверхности максимальных давлений колонкового заряда, разбиваем его на заряды элементарной длины, каждый из которых создаст вокруг себя поле напряжений.

Общее давление в данной точке будет равно сумме давлений создаваемых каждым элементарным зарядом. Сумма давлений есть площадь между кривой вида $y = x^{-3}$ в определенных пределах и горизонтальной осью координат.

Площадь плоской фигуры

$$S = \int_a^b f(x) dx$$

Уравнение кривой волновой поверхности максимальных давлений:

$$S = \frac{\kappa P}{2} \left(1 - \frac{1}{\ell^2}\right) + \frac{(1-\kappa)P}{2} \left[1 - \frac{1}{(\ell - \rho)^2}\right]$$

где: κ - доля заряда, находящаяся по одну сторону от точки, в которой определяется давление или доля заряда длиной ℓ от общей длины его L .

Кривая по данному уравнению может быть заменена эллипсом с полуосями a и b .

После преобразований получаем уравнение кривой профиля воронки выброса для колонкового сплошного заряда:

$$M \frac{b^4}{a^4} \left(\frac{b^2}{a^2} \frac{x}{y} + y \right) = (H-y) r \left(\frac{b^4}{a^4} x^2 + y^2 \right)^{3/2} \left[1 + \frac{1}{(y')^2} \right] \quad (25)$$

Кривая профиля зоны дробления определяется параметрическими уравнениями:

$$x_2 = x_1 + \frac{\rho y'}{\sqrt{(y')^2 + 1}}; \quad y_2 = y_1 - \frac{\rho}{\sqrt{(y')^2 + 1}} \quad (28)$$

Сделав допущения, аналогичные произведенным при определении профилей для сосредоточенного заряда, получим тригонометрические уравнения:

I) профиля воронки выброса

$$(H - r \sin \varphi) r = \frac{M \sin \varphi}{\gamma^2} \quad (31)$$

или

$$(H - y) r = \frac{M y}{\sqrt{(x^2 + y^2)^3}} \quad (32)$$

ВВЕДЕНИЕ

Взрыв - одно из весьма сложных явлений неорганической природы, характерной особенностью которого является большое разнообразие его результатов. Это затрудняет создание как теории разрушения горных пород в целом, так и отдельных положений о действии взрыва.

Трудность учета всех факторов при механическом действии взрыва, невозможность непосредственного наблюдения за его развитием, искажение результатов последующими явлениями остаются до настоящего времени главной причиной недостаточной изученности взрыва как физического процесса.

Формирование зоны разрушения среды, зависимости ее формы и размеров от условий взрывания, свойств ВВ и взрываемых сред - одно из фундаментальных, но до сих пор не изученных положений действия взрыва в горных породах.

До настоящего времени исследователи, на основе наблюдения, принимали формы зон разрушения в качестве тех или иных правильных геометрических форм. Практика же взрывных работ свидетельствует о сложных и разнообразных формах зон разрушения, значительно отличающихся от принятых.

Эмпирический метод, широко распространенный при изучении взрыва, не дает возможности вскрыть общие закономерности формирования зон разрушения. Необходимо изменение методики исследования, изыскание метода, позволяющего вскрыть развитие процесса. Таким методом должны стать аналитические исследования. Лабораторная и промышленная практика располагают достаточно обширными данными о действии взрыва в различных условиях, что и может быть основой построения принципиальной схемы развития взрыва и математического описания его.

Данная работа посвящена определению форм зон разрушения одиночного заряда аналитическим методом на основе математического описания теоретических положений о механическом действии взрыва в горных породах.

Работа изложена на 124 страницах машинописного текста с 52 рис. и 9 таблицами; состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы.

ГЛАВА I. ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Необходимость определения форм зон разрушения горных пород взрывом исторически возникла в связи с необходимостью расчета величины заряда ВВ.

Исследователи, занимающиеся этим вопросом, принимали форму зон разрушения, исходя из данных, полученных при определении и замерах воронок взрыва в различных изучаемых условиях. Отсутствие теоретического обоснования приводило к различной оценке получаемых результатов.

Для сосредоточенного заряда иностранные исследователи принимали форму воронки взрыва в качестве правильной геометрической фигуры (конус, усеченный конус, параболоид или сфероид вращения и т.д.). Русские инженеры М.М.Фролов и М.И.Боресков установили, что воронка выброса имеет сложную форму, не отвечающую ни одной из перечисленных выше. Кроме того, в зависимости от величины заряда, форма ее изменяется.

Для колонкового заряда при двух обнаженных поверхностях в настоящее время принимаются: клин с треугольным сечением, цилиндр с круглым или корытообразным сечением.

Главными задачами управления взрывом является получение необходимых профилей разрушения и кондиционных фракций крупности.

Исследование количественных характеристик разруше-

ния, т.е. степени дробления и объема выброса, требует знания области, в которой эти процессы происходят. Размеры зон разрушения определяют решение таких задач теории и практики взрывного дела, как зависимость результатов взрыва от величины заряда, его конструкции и условий взрывания, рациональные параметры буровзрывных работ и т.д. Но определение размеров зон разрушения невозможно без установления их формы. Следовательно, вопрос о форме зон разрушения по существу своему является одним из основных содержаний общей теории разрушения горных пород действием взрыва.

Горные породы характеризуются большими колебаниями количественных показателей физико-механических и структурных свойств. Временные сопротивления различным деформациям изменяются в десятки и даже сотни раз. Установлено, что они зависят и от размеров испытываемых образцов. Структурные свойства (пористость, трещиноватость и т.д.) измеряются относительными показателями, значения которых также колеблются в очень широких пределах.

В больших диапазонах изменяются и показатели свойств промышленных ВВ: бризантность до 300 %, работоспособность более 170 %, скорость детонации до 350 %, давление на фронте волны от 60.000 до 300.000 кг/см.

Взрыв является сложным процессом взаимодействия различного проявления энергии заряда (давление газов, волна напряжения) с многообразными свойствами взрываемых сред. Различные количественные соотношения величины и характера проявления энергии и прочностных характеристик окружающей среды, обусловленных ее свойствами и геометрией расположения заряда, определяют многозначность результатов действия взрыва, наблюдаемых в практике. Это порождает наличие многих, зачастую непохожих между собой, теоретических воззрений о механизме разрушения горных пород взрывом. Общепризнанная теория механического дейст-

вия взрыва в горных породах в настоящее время отсутствует.

Соответственно изложенному выше, задача данного исследования состоит в следующем: произвести определение форм зон разрушения горных пород для сосредоточенного и колонкового одиночных зарядов в неограниченном полупространстве с одной свободной поверхностью в плоскости, перпендикулярной границе раздела и проходящей через центр сосредоточенного заряда или ось сплошного колонкового заряда.

В практике взрывных работ одиночные заряды применяются редко. Однако, при изучении действия взрыва случай одиночного заряда играет основополагающую роль, т.к. является отправной позицией в изучении действия взрыва в сложных условиях: взрывов из серии зарядов, взрывов при нескольких обнаженных поверхностях.

ГЛАВА II. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Достоинством метода экспериментальных исследований, широко применяемого при изучении взрыва, является возможность непосредственной проверки принятых положений в ходе опыта, в его условиях. Наряду с этим, он обладает и существенным недостатком: результаты опыта и сделанные на основе их выводы справедливы только для данных конкретных условий опыта.

Попытки определения форм зон разрушения в широком диапазоне различных производственных условий встречают целый ряд естественных, вполне обоснованных трудностей. Лабораторные исследования, несмотря на определенные успехи, не могут охватить всего разнообразия тех условий, которые встречаются в практике промышленности и строительства. Применяемые в лаборатории материалы не полностью воспроизводят физико-механические и структурные

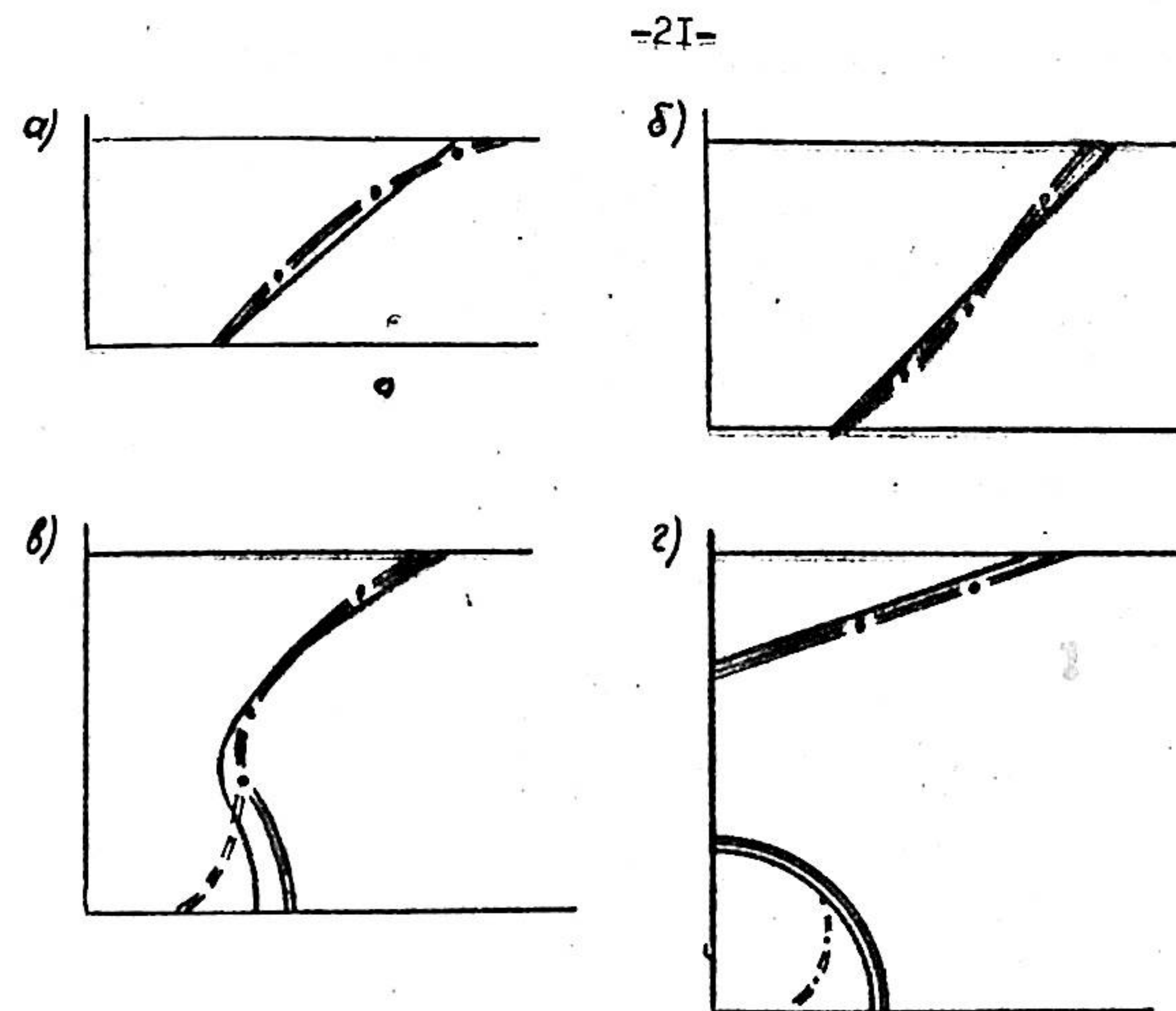


Рис. 4. Фактические и расчетные профили зон разрушения.

ческое с различным углом раствора) определяется углом наклона стенок воронки выброса, зависящих в свою очередь от величины заряда и глубины его заложения.

Для определения формы волновой поверхности максимальных давлений колонкового заряда, разбиваем его на заряды элементарной длины, каждый из которых создаст вокруг себя поле напряжений.

Общее давление в данной точке будет равно сумме давлений создаваемых каждым элементарным зарядом. Сумма давлений есть площадь между кривой вида $y = x^{-3}$ в определенных пределах и горизонтальной осью координат.

Площадь плоской фигуры

$$S = \int_a^b f(x) dx$$

Уравнение кривой волновой поверхности максимальных давлений:

$$S = \frac{\kappa P}{2} \left(1 - \frac{1}{\ell^2}\right) + \frac{(1-\kappa)P}{2} \left[1 - \frac{1}{(\ell - \ell)^2}\right]$$

где: κ - доля заряда, находящаяся по одну сторону от точки, в которой определяется давление или доля заряда длиной ℓ от общей длины его L .

Кривая по данному уравнению может быть заменена эллипсом с полуосями a и b .

После преобразований получаем уравнение кривой профиля воронки выброса для колонкового сплошного заряда:

$$M \frac{b^4}{a^4} \left(\frac{b^2}{a^2} \frac{x}{y} + y \right) = (H-y) r \left(\frac{b^4}{a^4} x^2 + y^2 \right)^{3/2} \left[1 + \frac{1}{(y')^2} \right] \quad (25)$$

Кривая профиля зоны дробления определяется параметрическими уравнениями:

$$x_2 = x + \frac{\ell y'}{\sqrt{(y')^2 + 1}}; \quad y_2 = y - \frac{\ell}{\sqrt{(y')^2 + 1}} \quad (28)$$

Сделав допущения, аналогичные произведенным при определении профилей для сосредоточенного заряда, получим тригонометрические уравнения:

1) профиля воронки выброса

$$(H - r \sin \gamma) r = \frac{M \sin \gamma}{\gamma^2} \quad (31)$$

или

$$(H - y) r = \frac{M y}{\sqrt{(x^2 + y^2)^3}} \quad (32)$$

2) профиля зоны дробления

$$x_2 = x + \ell$$

$$y_2 = y.$$

$$\text{где } \ell = \sqrt{\frac{M x_1}{6(x_1^2 + y_1^2)^{3/2}}} \quad (33)$$

Характер изменения кривых, построенных по дифференциальным и тригонометрическим уравнениям, также одинаков.

Достоверность кривых, полученных аналитически для колонковых сплошных зарядов, подтверждается следующими примерами из практики взрывных работ:

1. Разрушение уступа взрывом колонковых зарядов на открытых горных работах (рис. 5).

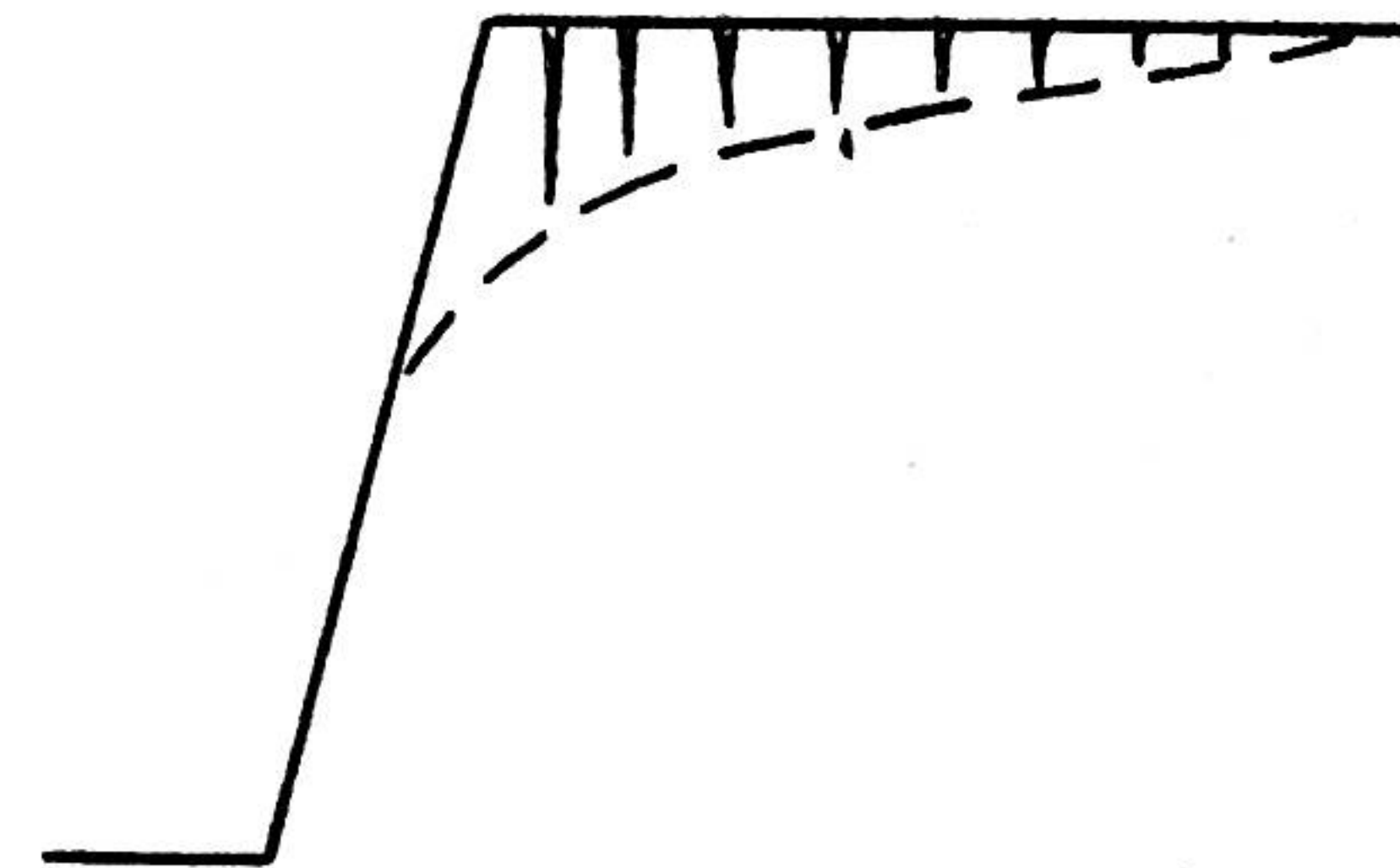


Рис. 5. Контур зоны дробления при взрывании скважинных зарядов на открытых горных работах.

2. Действие взрыва периферийных шпуров при проходке стволов шахт. При больших значениях H , т.е. при действии заряда за пределами поперечного

сечения шахты, уравнение решения не имеет. Выброс породы происходит по линии, являющейся продолжением стенки ствола (рис. 6).

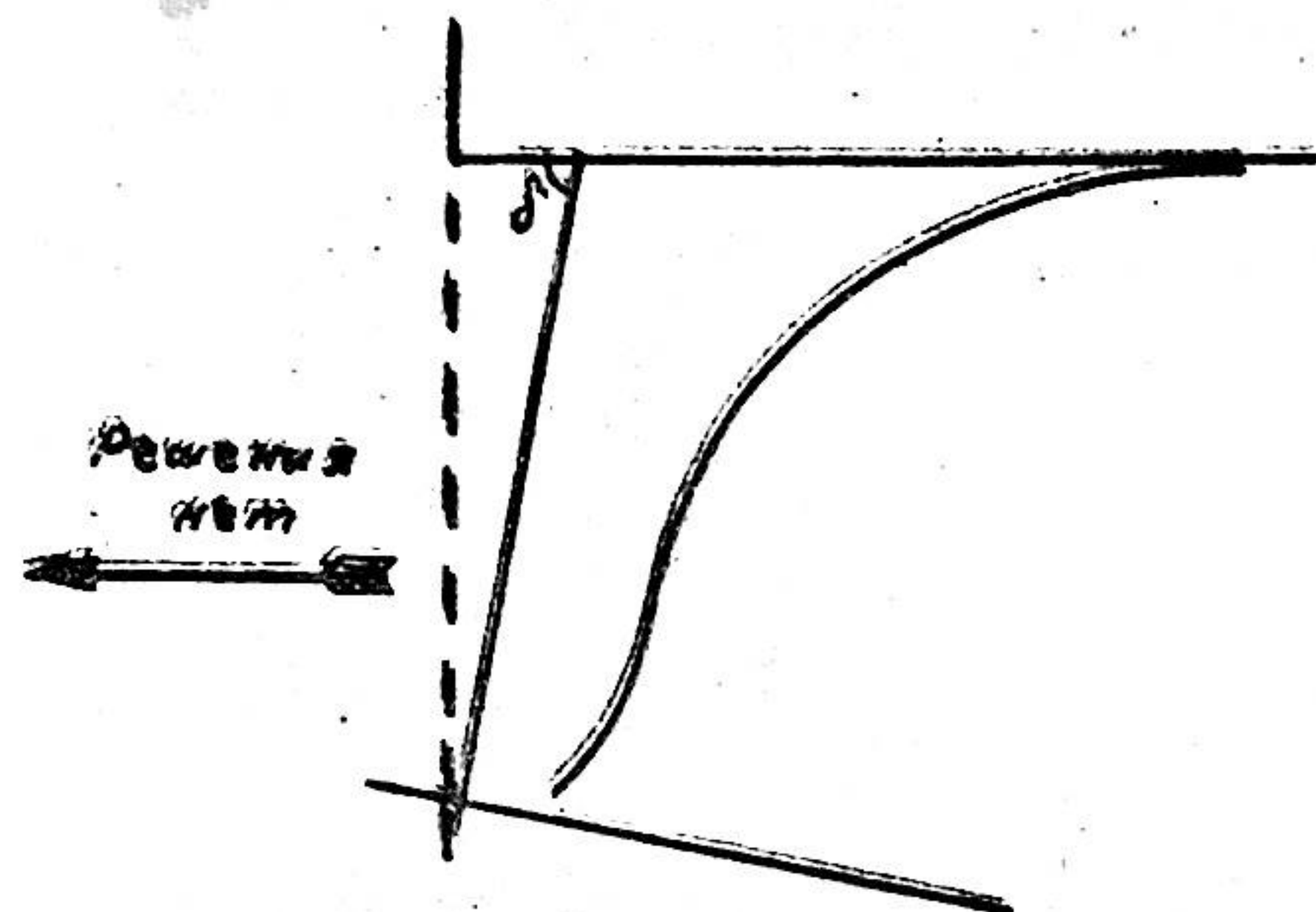


Рис. 6. Действие взрыва периферийных шпуров при проходке стволов шахт.

ВЫВОДЫ

1. На основе положений теоретической механики, анализа действия механических сил при взрыве на окружающую среду и взаимодействия их с силами сопротивления, возможно построение принципиальной, качественной схемы разрушения горных пород.

2. Применение математических методов исследования позволяет описать формы разрушения (воронку взрыва и зону дробления) сосредоточенного и колонкового сплошного зарядов при действии одиночного взрыва в монолит-

2) профиля зоны дробления

$$\begin{aligned} x_2 &= x + l \\ y_2 &= y \end{aligned} \quad \text{где } l = \sqrt{\frac{Mx_1}{6(x_1^2 + y_1^2)^{3/2}}} \quad (33)$$

Характер изменения кривых, построенных по дифференциальным и тригонометрическим уравнениям, также одинаков.

Достоверность кривых, полученных аналитически для колонковых сплошных зарядов, подтверждается следующими примерами из практики взрывных работ:

1. Разрушение уступа взрывом колонковых зарядов на открытых горных работах (рис. 5).

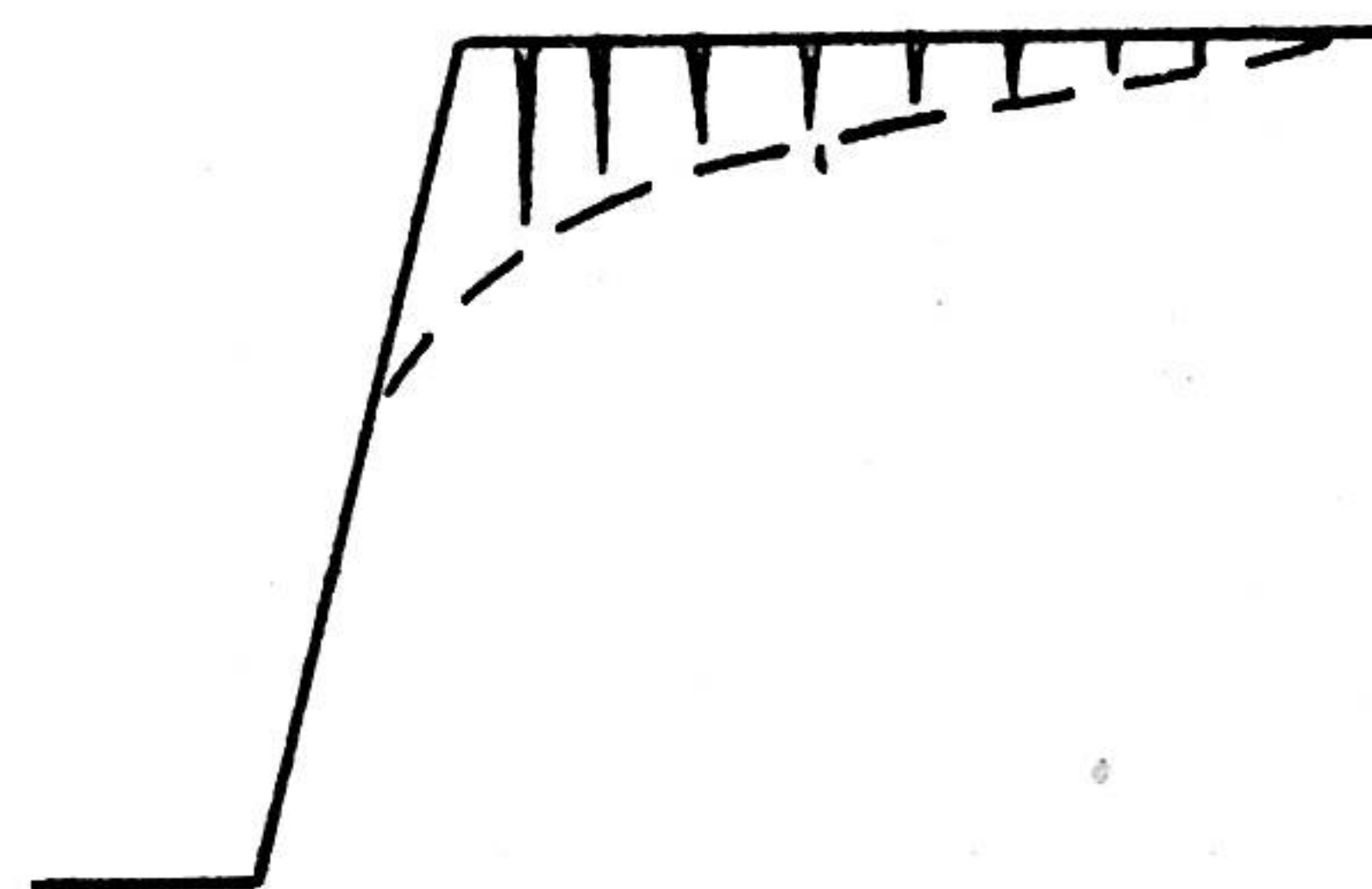


Рис. 5. Контур зоны дробления при взрывании скважинных зарядов на открытых горных работах.

2. Действие взрыва периферийных шпуров при проходке стволов шахт. При больших значениях H , т.е. при действии заряда за пределами поперечного

сечения шахты, уравнение решения не имеет. Выброс породы происходит по линии, являющейся продолжением стенки ствола (рис. 6).

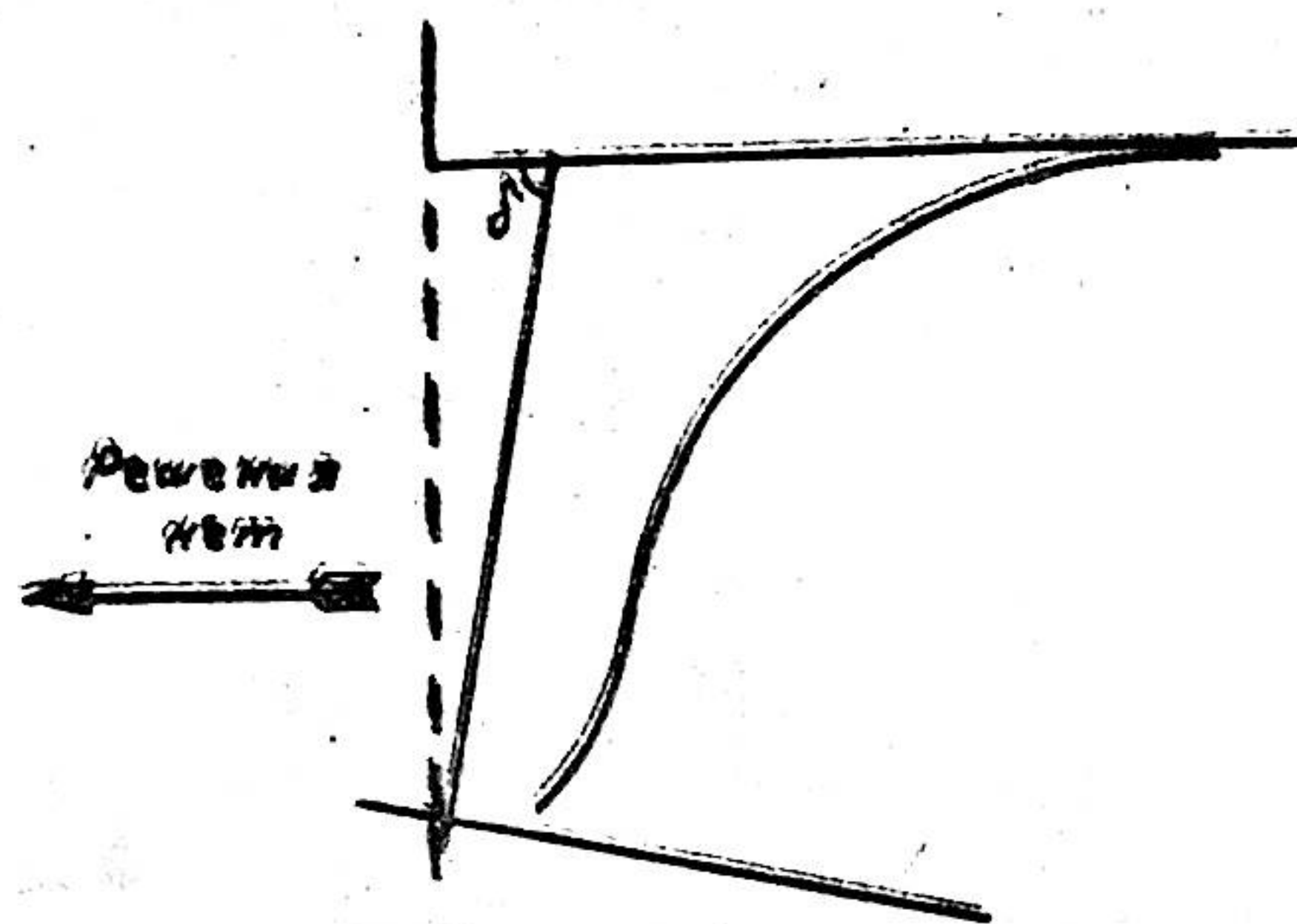


Рис. 6. Действие взрыва периферийных шпуров при проходке стволов шахт.

ВЫВОДЫ

1. На основе положений теоретической механики, анализа действия механических сил при взрыве на окружающую среду и взаимодействия их с силами сопротивления, возможно построение принципиальной, качественной схемы разрушения горных пород.

2. Применение математических методов исследования позволяет описать формы разрушения (воронку взрыва и зону дробления) сосредоточенного и колонкового сплошного зарядов при действии одиночного взрыва в монолит-

ных, не трещиноватых породах.

3. Профили воронки выброса и зоны дробления описываются дифференциальными уравнениями первого порядка. При определенных допущениях профили воронок выброса и зоны дробления описываются тригонометрическими уравнениями.

4. Аналитические исследования позволили установить, что:

а) профили зон разрушения сосредоточенного и колонкового сплошного зарядов не имеют постоянной геометрической формы;

б) при постоянной глубине заложения профили зон разрушения изменяются в зависимости от величины зарядов;

в) при постоянной величине заряда профили зон разрушения изменяются в зависимости от глубины заложения;

г) профили зон разрушения зависят от величины коэффициента полезного действия взрыва.

5. Разработанная методика определения форм и параметров профилей зон разрушения сосредоточенного и колонкового зарядов выведенных теоретически, подтверждается формами зон разрушения, установленных работами других исследователей в лабораторных и промышленных условиях.

Установленные зависимости позволяют объяснить такие явления взрыва как различные направления разлета взорванной горной массы, действия периферийных шпуров при проходке стволов шахт, действие взрыва при наклонных дневных поверхностях.

Профили зон разрушения подтверждаются практикой конкретных условий Кальмакырского рудника.

6. Установленные аналитические зависимости позволяют получить формулу объема воронки выброса в зависимости от величины заряда, выраженную через его

энергию, глубину заложения, объемного веса пород и коэффициента полезного действия.

7. Задачей дальнейших исследований следует считать постановку широкой программы опытов по определению величины коэффициента полезного действия взрыва и уточнению прочностных свойств горных пород.

Основные положения по теме диссертации опубликованы в статьях:

1. О форме образования воронки выброса и зоны дробления сосредоточенных зарядов. Колыма, № 6, Магадан, 1964.

2. Форма зон разрушения горных пород сосредоточенным зарядом ВВ. Сборник информационных материалов № 2 Средазнипроцветмета, Ташкент, 1967.

3. Эпюра давления на стенки скважины при взрыве сплошного колонкового заряда. Сборник информационных материалов № 3 Средазнипроцветмета, Ташкент, 1967.

4. Повышение интенсивности дробления горных пород взрывом. Сочавторы Бойнов Б.Н., Пысь Ф.Н., Удачин В.Г. Сборник информационных материалов № 5 Средазнипроцветмета, Ташкент, 1968.

Доложены на совещаниях:

1. Института кибернетики с ВЦ АН УзССР.

2. Треста Казахвзрывпром.

Р11099. Подписано к печати 9/VI-1970 года.
Заказ № 920. Объем 1,2 печ. листа. Тираж 100.

Отпечатано на ротакристе в типографии ТашНИИ
г. Ташкент, ИКуба Колеса, 13.