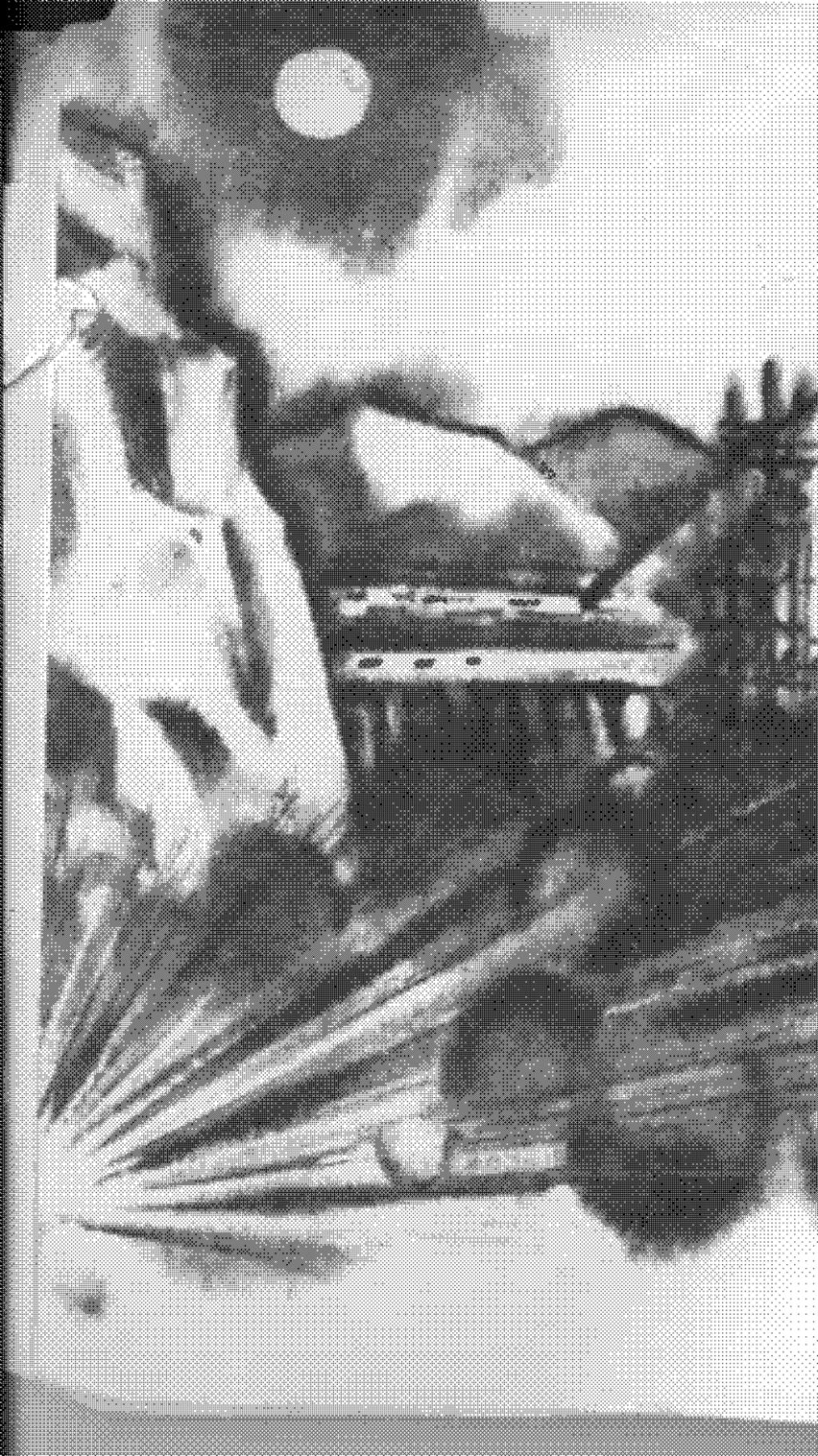


Г.И. Покровский

ВЗРЫВ



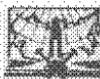


Г.И. Покровский

ВЗРЫВ

ИЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

МОСКВА «НЕДРА» 1980



У К 622.236.5.001.5

Покровский Г.И. Взрывы. 4-е изд., перераб. и доп.
М.: Недра, 1980. 190 с.

В книге в популярной форме обобщены и критически рассмотрены современные представления о природе взрыва и способах управления взрывом. Сложнейшие математические выкладки, решаемые подиас с применением электронно-счетных машин, представлены в виде общедоступных формул, дающих в принципе правильное представление о действиях взрыва, используемого в мирных, созидательных целях. В частности, рассмотрено введение направленным взрывом крупнейшей в мире Байкальской плотины, уникальной сопротивленной плотины в ущелье Медео. В 4-м издании (3-е изд. — 1973 г.) описаны новые объекты, созданные взрывом в последние годы, приведены интересные данные о сейсмике метаплаз и других материалов взрывом и другие сведения.

Книга предназначена для широкого круга читателей, интересующихся вопросами использования энергии взрыва в народном хозяйстве.

Табл. 2, ил. 56, список лит. — 31 назв.

П 30705-293
354-80 2502000000
043(01)80

© Издательство "Недра", 1980

К ЧИТАТЕЛЮ

Взрывы в природе происходят ежесекундно. Это взрывы отдаленных звезд, взрывы на Солнце, в космосе и атмосфере, при извержениях вулканов на Земле и на других планетах, в глубоких шахтах и на карьерах, в лабораториях ученых и в грозовых облаках. Это взрывы-великаны и взрывы-карлики, взрывы-созиатели и взрывы-разрушители, взрывы-каскады и одиночные мгновенные взрывы. Чрезвычайно сложна природа этого явления, открытого человеком несколько веков назад. Поставленный на службу людям взрыв все еще с трудом раскрывает свои тайны. Десятки, сотни тысяч людей имеют к взрыву самое непосредственное отношение — это ученые, инженеры, взрывники. Они все больше расширяют границы знаний о взрыве и этим завоевывают ему новые области применения.

Современная техника — это высокие скорости, громадные мощности, сложные преобразования энергии и вещества, происходящие за ничтожные промежутки времени. Именно это характерно для взрыва. Взрывы применялись человеком очень давно, но только в последние годы выработано достаточно ясное и глубокое понимание физической сущности взрыва и умение четко управлять гигантскими силами, возникающими при взрыве. Взрыв помогает строить шахты и карьеры, плотины электростанций и каналы, добывать руду, уголь, стройматериалы, горно-химическое сырье.

Брошюра "Взрыв", написанная известным советским ученым проф. Г.И. Покровским, могла бы быть названа "Физическая сущность взрыва". В книге не только обобщены, но и критически рассмотрены современные представления о природе взрыва и способах управления взрывом. Сложнейшие математические выкладки, решаемые подчас только с примене-

нием электронно-счетных машин, автор уложил в общедоступные расчеты и формулы, решение которых не вызывает затруднений даже у восьмиклассников. Вместе с тем предложенные автором упрощенные формулы дают в принципе правильное, практически не искаженное представление о разных замечательных свойствах взрыва.

В частности, здесь дано описание взрывов, позволивших с помощью направленного выброса породы построить крупнейшие плотины на реке Малой Алматинке вблизи столицы Казахстана Алма-Аты и на реке Вахше в Таджикистане. В этой области Советский Союз далеко опередил все страны мира и уверенно идет вперед, разевая применение взрыва-строителя.

Автор этой книги был главным консультантом правительственные комиссий, руководивших взрывами вблизи города Алма-Аты и на реке Вахше. Ему принадлежит авторское свидетельство на способ направленного выброса породы взрывом, примененный успешно в обоих этих случаях.

За сооружение каменнонабросной плотины Байпазинского гидроузла на реке Вахше массовыми направленными взрывами на сброс ему присуждена в 1971 году Государственная премия СССР.

Книга написана просто, доходчиво и увлекательно. Писать так о сложном — неотъемлемая черта Г.И. Покровского — замечательного педагога нашего времени.

Брошюра получила заслуженное признание у широкого круга читателей и ее четвертое переработанное и дополненное издание поможет любознательному читателю получить ответы на многие интересующие его вопросы.

На Всесоюзном конкурсе, организованном обществом "Знание" на лучшие произведения научно-популярной литературы 1965 г., книга отмечена поощрительным дипломом.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/10, издательство "Недра".

ИЗДАТЕЛЬСТВО

ПРЕДИСЛОВИЕ

М.В. Ломоносов в своей статье о происхождении и свойствах селитры дал классическое определение взрыва как явления, при котором происходит весьма быстрое выделение большого количества энергии и большого объема газов. Взрыв имеет большое значение в различных областях знания. Астрофизики, занимающиеся изучением вселенной, считают, что весь окружающий нас звездный мир произошел в результате необычайно грандиозного первичного взрыва. Образовавшиеся при этом скопления звезд — галактики, брошенные в разные стороны силой этого взрыва, разлетаются и сейчас с огромными скоростями в беспределном космическом пространстве ... Если на точильном камне точить стальной нож, то во все стороны разлетаются маленькие яркие искры и каждая такая искра — это тоже взрыв, взрыв микроскопического масштаба ... Люди начали применять взрыв очень давно. Например, когда московский царь Иван Грозный в 1552 году брал город Казань, стены этого города были разрушены мощным подземным взрывом, который был осуществлен без каких-либо предварительных опытов и дал точно тот результат, на который рассчитывали проводившие его умельцы.

Однако, несмотря на многовековой опыт применения взрыва для дробления горной породы и для разрушений в условиях войны, свойства взрыва оставались изученными только в малой степени в течение ряда столетий.

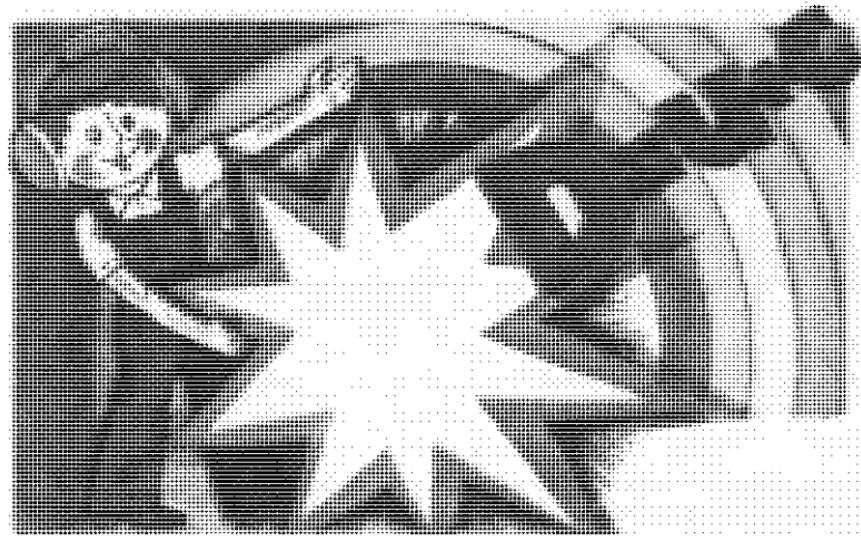
Только теперь, когда стала развиваться физика высоких температур и значительных скоростей, когда были созданы математические основы расчета действия взрыва и экспериментальные средства его изучения, оказалось возможным раскрыть огромные возможности применения взрыва в разнообразных

областях науки и техники. Вспомним хотя бы такие примеры.

Газета "Правда" 9 октября 1963 года писала: "... грандиозный взрыв перекроет горную реку Малую Алматинку надежной плотиной. Ее высота — 93 метра, ширина вверху — 60 метров, а у основания — 450 метров". Так готовился самый мощный в мировой строительной практике взрыв, который за несколько секунд выполнил работу десятков экскаваторов, бульдозеров, скреперов и других машин. Такая плотина общим объемом около 2,5 млн. м³ была построена с помощью двух взрывов, проведенных 21 октября 1966 года и 14 апреля 1967 года. Всего было израсходовано около 9500 тонн взрывчатых веществ и создана надежная защита столицы Казахстана от внезапных наводнений — горных селей. Эта плотина показала свою высокую эффективность, остановив 15 июля 1973 года внезапное горное наводнение — сель невиданного масштаба, — сравнимое по своей энергии со взрывом атомной бомбы среднего калибра.

Еще более результативным было перекрытие каменной плотиной реки Вахш в Таджикистане с помощью мощного направленного взрыва, осуществленного 29 марта 1968 года. По мощности потока воды река Вахш превосходит Енисей в 3 раза. Никаким другим способом было бы невозможно остановить на века такую реку. Это оказалось под силу только созидальному взрыву 2000 тонн взрывчатки, направленному мудрой рукой советского человека.

Что же представляют собой физические основы взрыва и каковы возможности мирного использования этого агрессивного по своей природе явления? Об этом расскажет настоящая брошюра. Она будет доступна читателю, имеющему знания по физике и математике в объеме восьми классов средней школы.



Трудно представить себе человека, который не мог бы ответить на вопрос, что такое взрыв. Взрыв можно увидеть на экранах телевизоров, в кинофильмах о войне, на суше, на море и в воздухе. Обычно запоминается яркий огонь, бурно клубящийся дым, хаотически летящие в воздухе комья земли...

Но бывают и такие случаи, когда взрыв оказывается едва заметным, но приводит к роковым последствиям. Американский физик Вуд так описывает случай, произошедший в 1936 году:

Как-то раз одна американка подошла к камину и стала ворошить кочергой горевший в нем уголь. Вдруг раздался еле слышный щелчок и девушка беззвучно упала на пол. Ее пытались привести в чувство, но безуспешно. Прибывший вскоре врач констатировал смерть. Вскрытие показало, что сердце девушки пробито микроскопическим кусочком металла насквозь. Этот кусочек был так мал, что в том месте, где он вошел в тело, осталось только маленькое пятнышко и не выступило даже капли крови.

ЧТО ТАКОЕ ВЗРЫВ?

Были подняты на ноги все средства уголовного розыска, многие ученые бились над разгадкой этой тайны. Долгое время никто не мог понять, в чем дело.

А между тем... В угле случайно остался детонатор, применяемый при взрывных работах по добыче угля. Детонатор имел металлическую оболочку с небольшой выемкой в торцовой части. При взрыве детонатора выемка дает эффект кумуляции. Кумулятивная струя, образовавшаяся при взрыве, и поразила сердце девушки. Найденная в сердце частичка металла была остатком этой страшной кумулятивной струи. А слабый звук при взрыве детонатора объясняется тем, что взрыгная волна проходила сквозь пламя в камине...

Чтобы правильно оценить значение взрыва в промышленности и науке, чтобы точно определить, где целесообразно применить взрыв, как обеспечить безопасность при проведении взрывных работ, и для решения многих других практических и теоретических задач широко распространенного житейского представления о взрыве совершенно недостаточно.

Что же нужно, чтобы в достаточной мере понять явление взрыва?

Во взрывной технике существуют специальные инструкции, наставления и другие документы, без изучения которых нельзя не только вести взрывные работы, но даже иметь какое-либо соприкосновение со взрывчатыми веществами и устройствами для их взрыва.

Для глубокого понимания официальных документов необходима серьезная подготовка, так как в настоящее время невозможно решить ни одной технической задачи без понимания физической сущности тех явлений, которые при этом используются, без количественного расчета, который может строиться только на основе объективных законов природы и в первую очередь на основе законов физики.

Итак, ответ на вопрос, что такое взрыв, необходимо давать, исходя из тех законов физики, которые определяют возникновение, развитие и действие взрыва.

Впервые такая задача была поставлена в середине XVIII века М. В. Ломоносовым. В работе "О природе и рождении селитры", написанной в 1748 году, он дает определение взрыва, которое на современном языке звучит так:

Взрыв — это очень быстрое выделение большого количества энергии и большого объема газов.

С первого взгляда определение настолько просто и понятно, что кажется даже малосодержательным. Однако при более вни-

мательном подходе оказывается, что в нем простота и ясно сочетаются с глубоким анализом явления взрыва.

Прежде всего выясним, что значит "очень быстрое" выделение энергии. Быстрота тех или иных явлений — понятие относительное. Следовательно, очень быстрое выделение энергии взрыва должно сравниваться с другими видами выделения или образования энергии.

Таким образом, выделение энергии при взрыве является существенно более быстрым, чем другие формы выделения энергии в сходных условиях. Например, выделение энергии при взрыве значительно быстрее, чем выделение энергии при горении. Наиболее важным при взрыве является то, что энергия выделяется в пределах заряда взрывчатого вещества быстрее, чем она потом передается окружающей среде.

Что означает большое количество энергии? Это определение надо рассматривать, сравнивая энергию взрыва с той энергией, которая так или иначе содержится в среде окружающей место взрыва. В этом определении важно то, что выделяющаяся при взрыве энергия намного больше энергии содержащейся в окружающей среде.

Необходимо также уточнить понятие выделение энергии. Как известно, энергия не может возникать из ничего или исчезать бесследно. Поэтому под выделением энергии понимают превращение в энергию взрыва соответствующего запаса энергии, которая накоплена и находится в скрытой, потенциальной форме в том или ином месте.

До момента взрыва обычного взрывчатого вещества энергия взрыва содержится в скрытой, потенциальной форме в его молекулах, точнее, в электронных оболочках этих молекул. Однако простое выделение энергии еще не означает, что произошел взрыв. Понятие взрыв связано с сильным механическим действием, т.е. с появлением механических сил, приложенных к среде и отдельным телам, окружающим место взрыва. Если этого нет, то нет и взрыва.

Чтобы выделившаяся энергия могла осуществить механическое действие, нужно рабочее тело, т.е. вещество, которое могло бы произвести достаточно большое давление на окружающую среду. С этой точки зрения взрыв может рассматриваться как результат работы очень мощного теплового двигателя, действующего в течение весьма малого времени. При этом газы, будучи вначале сильно нагретыми и сжатыми, расширяются и производят механическую работу, перемещая среду, окружающую место взрыва.

Чтобы обеспечить сильное нагревание выделившихся при взрыве газов и создать в них высокое давление, необходимо, чтобы энергия выделилась либо в этих газах, либо была передана им до того, пока еще не произошло заметных потерь энергии и заметного увеличения их объема. Это значит, что процесс выделения или передачи энергии должен распространяться со скоростью, заметно превосходящей скорость расширения взрывных газов.

Обычно при взрыве начальная скорость расширения газов достигает около одного километра в секунду. Скорость распространения процесса взрыва, называемого детонацией, у взрывчатых веществ несколько больше и находится в пределах от двух до восьми километров в секунду.

При взрыве какого-либо взрывчатого вещества, например тротила, происходит его преобразование в раскаленные взрывные газы, имеющие высокое давление. При этом энергия выделяется первоначально в виде теплоты, заключенной в сильно сжатых газах. Газы действуют на окружающую среду с такой силой, что эта среда начинает сжиматься и перемещаться. Поэтому газы получают возможность расширяться, производя работу подобно газам, движущим поршень в двигателе внутреннего сгорания, но с тем отличием, что взрывные газы раздвигают окружающую среду по всем возможным направлениям, а газы в двигателе внутреннего сгорания двигают поршень только по оси цилиндра. При расширении газы интенсивно охлаждаются, их давление быстро падает и энергия передается окружающей среде с очень большим коэффициентом полезного действия.

Однако в отличие от действия газов в тепловых двигателях действие газов взрыва ВВ отличается тем, что при этом взрыве энергия газов передается непосредственно окружающей среде, которую можно рассматривать как материал, обрабатываемый действием взрыва. Таким образом, при взрыве как бы совмещаются машина-двигатель и машина-орудие, причем и тем и другим являются взрывные газы.

Взрывы могут осуществляться при помощи самых различных источников энергии. Здесь прежде всего следует указать на ядерные взрывы, при которых быстрое выделение энергии обусловлено ядерными реакциями, т.е. превращениями атомных ядер.

Эти реакции могут быть двух видов. Во-первых, деление тяжелых ядер (урана, плутония, калифорния). При этом на единицу массы взрывающегося вещества выделяется в 20 миллио-

нов раз больше энергии, чем при взрыве тротила. Во-вторых, источником энергии ядерного взрыва является соединение атомных ядер легких элементов (тяжелый водород — дейтерий, сверхтяжелый водород — тритий, литий). В этих реакциях энергия взрыва, выделяемая единицей массы, превосходит энергию тротила примерно в 100 миллионов раз.

Мощные ядерные взрывы происходят временами на поверхности Солнца. Ядерные взрывы происходят нередко в космосе. Некоторые звезды обладают особой структурой; вследствие этого на определенной стадии развития звезды внутри нее происходят настолько сильные взрывы, что значительная часть массы звезды отрывается и рассеивается в космическом пространстве.

При взрыве звезд яркость их свечения внезапно и очень сильно возрастает. Нередко слабая, малозаметная или совсем невидимая звезда при таком взрыве начинает очень сильно выделяться среди окружающих ее звезд. Она как бы вспыхивает вновь среди звезд, испускающих неизменное излучение. Поэтому эти звезды называют *новыми*. Есть среди новых звезд такие, которые вспыхивают особенно ярко. Тогда их называют *сверхновыми*.

Взрывы могут быть и иного рода, когда энергия, выделяемая при взрыве, приносится в зону взрыва извне. Примером этого может служить мощная электрическая искра. Особенно сильное механическое действие может вызвать электрическая искра в жидкости или внутри твердого тела: разрушить сосуд, содержащий жидкость, или разбросать в разные стороны осколки твердого тела. Эти явления в последнее время стали широко применяться в промышленности для обработки различных материалов, их дробления, для штамповки металлов и т.п.

Другим примером взрыва, получаемого за счет энергии, приносимой извне, можно считать микроскопические по размерам, но очень сильные по концентрации энергии световые взрывы. Эти взрывы возникают при освещении некоторых материалов очень мощными световыми импульсами. Необходимые для этого световые импульсы получаются в так называемых *квантовых генераторах* (лазерах).

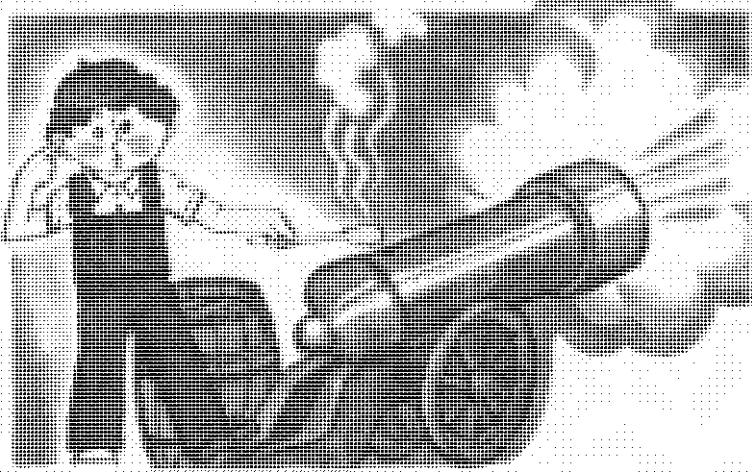
Менее мощные взрывы могут происходить и без выделения энергии в результате каких-либо реакций или ее привнесения извне. Причиной этого вида взрывов может быть внезапное разрушение сосуда, содержащего сильно сжатый газ или пар. Примером таких взрывов являются взрывы баллонов со сжатым воздухом или другими газами, взрывы паровых котлов.

Взрывообразный характер имеет разрушение сильно сжатых хрупких тел, сопровождающееся интенсивным разлетом их кусков. Так разрушаются, например, массивные стеклянные шары, сжимаемые гидравлическим прессом.

Взрывом обычно заканчиваются очень сильные удары быстро движущихся тел о прочные преграды. Такие взрывы происходят при ударе метеоритов о поверхность земли.

Метеориты могут также взрываться от неравномерного разогревания их массы при движении в воздухе. Таким был, по-видимому, грандиозный взрыв тунгусского метеорита.

Взрывы такого же характера, но имеющие очень маленький масштаб, происходят при разлете искр, возникающих при обтравивании многих сортов стали на точильном круге. Сияющие разлетающиеся искорки в конце своего пути взрываются, вспыхивая подобно небольшим звездочкам с несколькими яркими лучами, расходящимися в разные стороны.



Уже в глубокой древности человек был знаком со взрывами, но эти взрывы были особого рода. Они осуществлялись природой, а не человеком, и освобождалась при этом не химическая, а электрическая энергия. Это были молнии. Человек не мог управлять этими взрывами. Поэтому ему казалось, что молниями управляют могущественные боги.

Только в эпоху высокого развития производства человек стал осуществлять взрыв по собственной воле.

Еще в первые века нашей эры в таких развитых странах, как Византия, люди заметили, что многие вещества могут интенсивно гореть. При этом горение может происходить обычно только в воздухе. Если бросить горящее тело в воду, горение прекращается.

Однако это происходит не всегда.

Если горящее тело имеет щели, отверстия или иные полости, заполненные селитрой, то оно продолжает гореть и под водой. Это происходит потому, что кислород, необходимый для горения, выделяется в большом количестве при нагревании селитры. На этом принци-

ДЕСЯТЬ ВЕКОВ В ГЛУБЬ ИСТОРИИ

ле византийцы получали горючее для так называемого греческого огня, с помощью которого они боролись с кораблями противника. В многочисленных боях у берегов и в открытом море византийцы причинили много неприятностей кораблям противников своим не гаснущим в воде огнем.

Дальнейшее развитие не гаснущего в воде горючего привело к тому, что горючее вещества и вещество, поддерживающее горение выделяющимся при горении кислородом, стали размалывать все мельче и мельче и тщательно смешивать друг с другом. Это привело к ускорению реакции горения, что является одной из характерных особенностей взрыва.

История практического применения взрыва начинается в X веке, когда впервые был изготовлен черный порох. Он представлял собой смесь мелко раздробленного угля и селитры. Взрыв этого пороха обусловлен очень быстрым сгоранием угля в кислороде, выделяющемся из селитры при нагревании ее. В зависимости от плотности заряда черного пороха, а также от того, насколько мелко раздроблены уголь и селитра (составляющие пороха), и герметичности сосуда, в котором он находится, скорость горения пороха может быть самой различной. Если черный порох находится в стволе пушки, он сгорает очень быстро и это горение напоминает взрыв. То же самое происходит, если порох помещен внутри грунта в камере, не имеющей сообщения с наружным воздухом.

Если же в сосуде, где находится порох, имеется достаточно большое отверстие, то порох горит сравнительно долго, а образующиеся при горении пороховые газы вырываются из отверстия в виде мощной струи. Такой сосуд с горячим порохом является простейшим вариантом реактивного двигателя. Он начинает стремительно двигаться в сторону, противоположную направлению струи пороховых газов.

Это явление было замечено уже в X веке нашей эры создателями первых пороховых ракет.

Разными путями проникали в XIV веке в Европу и Россию сведения о порохе. Историческая обстановка средневековья не располагала к быстрому развитию техники. Поэтому в течение нескольких столетий порох применялся только для военных целей, притом нередко со значительным искусством. Техника взрывного дела уже в то время позволяла достаточно точно определить вес заряда для разрушения крупных зданий, обеспечить взрыв заряда (произвести инициирование его) в заданный момент времени.

В этом отношении выдающихся успехов достигли русские артиллеристы в XVI веке. При осаде Казани в 1552 году войска Ивана Грозного подкопали одну из наиболее крупных башен Казанского Кремля и в подземную камеру заложили заряд черного пороха массой примерно в одну тонну. Этот заряд был подорван с помощью фитиля. При этом был обеспечен довольно точный расчет момента взрыва. Это облегчило штурм и взятие Казани русскими войсками.

Сохранился "Устав дел ратных", составленный в Пушкарском приказе по указанию царя Василия Шуйского в Москве дьяком Михайловым за период 1606—1620 гг. Устав представляет собой своеобразную энциклопедию военной техники того времени и содержит много любопытного, в частности конкретные рекомендации по устройству фугасных, осколочных и даже химических боеприпасов.

К сожалению, значительная часть засекреченных в свое время архивов Московского Пушечного Двора погибла при пожаре 1699 года и наиболее интересные достижения русских взрывников остались неизвестными.

Развитие взрывного дела имело преимущественно практическое направление. В XVII веке в Венгрии и Германии стали применять порох в шахтах для дробления крепких скальных пород. Еще раньше — в 1548—1572 годы — в Литве (входившей в то время в состав Польши) были проведены большие по тому времени работы по разрушению крупных камней, мешавших судоходству на реке Немане. Здесь было проявлено большое искусство при проведении взрывов под водой — черный порох должен быть совершенно сухим для получения полноценного взрыва.

Дальнейшее развитие пороховой промышленность получила в России во время царствования Петра I. К этому времени относится создание первых приборов, предназначенных для определения удельной энергии взрыва черного пороха. Образцы таких приборов, изготовленных из золоченой бронзы, находятся в ленинградском Эрмитаже. Они настолько хорошо сохранились, что могут быть и сейчас применены для экспериментов.

Сущность устройства этих приборов состоит в следующем. Определенное количество пороха помещается внутри небольшой мортирки, в которую плотно входит снаряд-поршень. Порох поджигается через очень узкое отверстие в стенке цилиндра. Получаемые при горении пороха пороховые газы поднимают снаряд-поршень на определенную высоту вверх. Двигается поршень по соответствующим направляющим и автоматически

удерживается в момент наибольшего подъема. Это дает возможность определить высоту подъема цилиндра. Умножая массу снаряда-цилиндра на высоту его подскока при взрыве и деля это произведение на массу пороха, заложенного в мортирку, можно получить достаточно точно значение удельной энергии взрыва пороха.

Такие приборы были, по-видимому, весьма нужны для контроля качества продукции многочисленных пороховых заводов, поставлявших порох для нужд армии и флота. Впрочем, в начале XVIII века в России интересовались использованием взрывов не только для военных целей. Царь Петр I, используя старые традиции русских умельцев-взрывников, предложил оригинальный способ автоматически тушить пожары. С этой целью внутри помещения, охраняемого от пожара, устанавливалась деревянная бочка с водой. Внутри нее располагался изолированный от воды заряд черного пороха. От этого заряда в различные части помещения были проанесены огнепроводящие шнуры, снаряженные порохом. При возникновении пожара огонь попадал на один из шнурков и достигал по нему порохового заряда. Заряд взрывался и с большой силой разбрасывал воду по всему помещению, в результате чего пожар прекращался.

Сохранились сведения, что были проведены испытания этого способа в присутствии царя и всего царского двора. Были одновременно подожжены две избы, одна из которых имела описанную защиту от пожара, а другая — нет. В результате незащищена изба сгорела, а в защищенной пожар потух.

В XVIII веке уровень артиллерийской и взрывной науки в России был высоким. В эти годы в Россию приехал молодой швейцарец Леонард Эйлер, впоследствии ставший всемирно известным академиком. Он подтвердил, что своими успехами и знаниями многим обязан тем опытам в области артиллерии, которые он проводил, приехав в Россию в молодости.

Дальнейшее развитие взрывного дела в течение этого столетия имело преимущественно практическое направление, причем главным достижением этого времени было создание многочисленных новых взрывчатых веществ, весьма мощных, со значительной удельной энергией взрыва.

Далее теория взрыва стала развиваться только во второй половине XIX века. В это время немецкий ученый Риман ввел понятие об ударных волнах, имеющих в теории взрыва решающее значение. Французский ученый Гюгонио разработал теорию связи давления и объема в газах при быстром изменении их состояния.

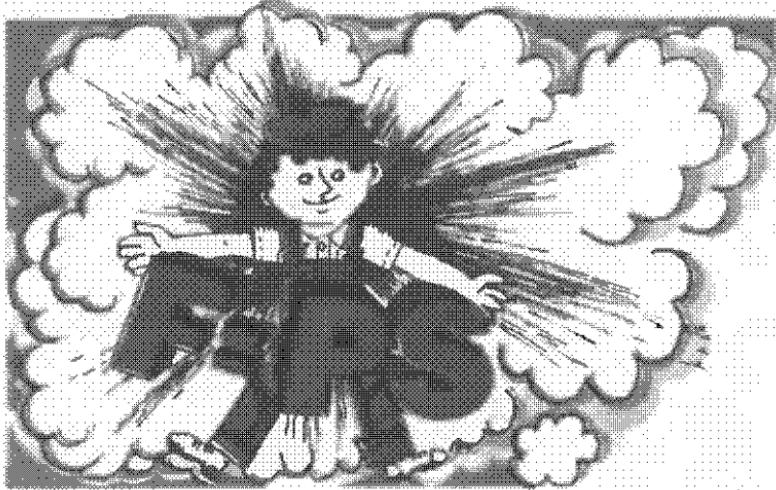
В России многое для развития теории взрыва было сделано знаменитым химиком Д.И. Менделеевым, который впервые отметил огромное значение взрыва для изучения вещества при весьма высоких давлениях и температурах, в частности для целей астрофизики и геофизики.

Разработка математической теории детонации взрывчатых веществ, т.е. распространения в них процесса взрывного разложения, была осуществлена в 1890 году в Москве профессором В.А. Михельсоном. В Англии вопросами детонации занимался Д. Чепмен, во Франции — Э. Жуте.

В Советском Союзе вопросы теории взрыва разрабатывали Я.Б. Зельдович, А.С. Компанеец, М.А. Паврентьев, К.П. Станюкович, М.А. Садовский, А.И. Седов, А.А. Черниговский, Ф.А. Баум и многие другие ученые.

В настоящее время в Советском Союзе появился ряд оригинальных теоретических и экспериментальных работ, касающихся взрыва. Советскими учеными освоены способы проведения очень крупных взрывов на выброс. Самым крупным из них является взрыв, проведенный под руководством советских ученых в Китае в районе Ланьчжоу в 1956 году, при котором масса заряда составила 9200 т. Теория расчета принадлежит в этом случае Г.И. Покровскому, а общее руководство взрывом — М.М. Докучаеву.

Самым крупным взрывом, осуществленным в капиталистических странах, является взрыв скалы Рипл-Рок на Тихоокеанском побережье Канады. Масса заряда была при этом равна 1200 т.



Сила взрыва рождается в мире молекул

Взрыв представляет собой выделение того или иного количества энергии¹. Чем больше выделяется энергии, тем сильнее взрыв. Взрывчатые вещества хранят в своих молекулах запасы энергии, которые при определенных условиях вырываются наружу. Способность производить работу при взрыве можно применить для оценки того, какой запас энергии был скрыт внутри взрывчатого вещества. Количество такой энергии, находящейся в каждом килограмме взрывчатого вещества, является очень важным показателем как для практических выводов, так и для теоретических расчетов. Такая энергия называется *удельной энергией взрывчатого вещества*.

До взрыва энергия находится в скрытой, потенциальной форме. Наиболее характерный

НА ПОДСТУПАХ К ТЕОРИИ

¹ Здесь и далее под понятием *выделение энергии* следует понимать преобразования (переход) потенциальной энергии в кинетическую.

пример этому – обычные взрывчатые вещества. Сюда же следует отнести такие ядерные взрывчатые вещества, как уран и искусственно получаемые плутоний и калифорний, а также дейтерий и литий.

Однако в настоящее время ядерные взрывчатые вещества пока еще не нашли широкого применения в промышленности и строительстве.

Прежде всего потому, что до сих пор еще не найдено возможности производить ядерные взрывы с достаточно высоким коэффициентом использования ядерного взрывчатого вещества и достаточно малой общей энергией взрыва. Взрывы же с очень большой энергией, эквивалентной тысячам или миллионам тонн тротила, осуществляемые при помощи ядерных взрывчатых веществ, являются пока еще слишком мощными для современной практики.

При таких условиях особое значение сохраняют обычные взрывчатые вещества, возможности которых далеко еще не исчерпаны.

Обычные взрывчатые вещества называют нередко *химическими взрывчатыми веществами*. Это определяется тем, что энергия при взрыве обычных взрывчатых веществ выделяется в результате химических реакций. Взрываются могут вещества, находящиеся в твердом, жидком и газообразном состояниях, поэтому химические реакции могут быть весьма разнообразными.

Значительная часть применяемых на практике взрывчатых веществ – твердые тела, находящиеся в состоянии массивных тел (тротил, гексоген и т.д.), сухих порошков или порошков, пропитанных жидкостью. Жидкие взрывчатые вещества применяются редко; взрывающиеся газы или взвеси в воздухе быстро сгорающих мелко раздробленных частиц как взрывчатые промышленные вещества пока не нашли практического применения. Однако такие взрывающиеся газы или взрывающаяся пыль, взвешенная в воздухе, часто встречаются на практике.

Непредусмотренные взрывы таких веществ в замкнутом пространстве могут возникать при распылении в воздухе угольной пыли, муки, сахарной пудры и т.д. и быть чрезвычайно опасными.

Взрывчатые вещества разделяются на несколько основных групп.

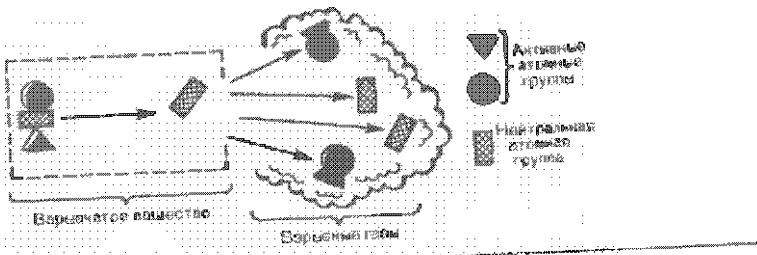


Рис. 1. Схемы выделения энергии из молекул взрывчатого вещества при взрыве

Причём всего можно выделить взрывчатые вещества, у которых каждая молекула содержит в себе все необходимое для взрыва. Молекулы таких взрывчатых веществ можно представить в виде двух активных групп атомов, разделенных малоактивной преградой. Такой преградой являются обычно атомы азота, который сам малоактивен в химическом отношении (рис. 1).

При повышении температуры взрывчатого вещества соответственно увеличивается скорость движения его молекул. Это приводит к увеличению силы молекулярных соударений. В результате достаточно сильных соударений молекулы взрывчатого вещества разрушаются. Активные атомные группы освобождаются, неактивные преграды, имевшиеся между ними, выбиваются и удаляются. Активные атомные группы приходят во взаимодействие друг с другом и из них образуются достаточно подвижные, имеющие большую скорость и несущие на себе значительную энергию взрывные газы. Эти газы быстро расширяются и передают среде, окружающей место взрыва, энергию своих молекул.

Другая группа взрывчатых веществ — смеси частиц, состоящие из различных молекул. Частицы представляют собой горючее вещество, способное гореть, соединяясь с кислородом. Необходимый для достаточно быстрого горения кислород не может быть получен в таких условиях из окружающей атмосферы. Это обусловлено слишком малой концентрацией атмосферного кислорода. Поэтому при взрыве необходимо обеспечить обильное выделение кислорода внутри взрывчатого вещества. С этой целью в состав взрывчатого вещества вводят частицы, молекулы которых разлагаются при нагревании и выделяют кислород, который быстро соединяется с горючим материалом;

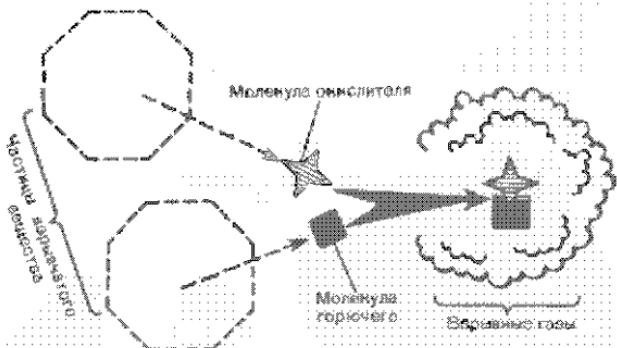


Рис. 2. Схема выделения энергии при взрыве взрывчатого вещества, представляющего собой смесь горючего и окислителя

температура при этом резко повышается. В результате горение образуются продукты сгорания (газы), которые быстро расширяются. Это и обуславливает действие взрыва на окружающую среду (рис. 2).

Примером взрывчатых веществ, являющихся смесями, можно считать оксиликвиты. Эти взрывчатые вещества представляют собой смесь твердого горючего вещества (например, древесных опилок) с жидким кислородом. Жидкий кислород может быть введен в смесь в достаточном количестве, чтобы обеспечить полное сгорание горючей части смеси. Однако для получения жидкого кислорода необходимо сильное охлаждение до температуры -180°C . Такое охлаждение связано со значительными трудностями. Кроме того, сильно охлажденный кислород быстро нагревается от окружающей среды, испаряется и рассеивается в окружающем пространстве.

Поэтому оксиликвиты должны применяться сразу же после их приготовления, в противном случае они теряют способность взрываться. Использование оксиликвитов на практике вызывает много трудностей, поэтому они не получили широкого распространения.

Особую группу взрывчатых веществ представляют смеси двух жидкостей. Одна из этих жидкостей является горючим веществом, другая содержит в составе своих молекул кислород, который выделяется при нагревании и обеспечивает сгорание горючей жидкости. В жидкости молекулы находятся в очень тесном контакте друг с другом. Поэтому химические реакции при взрыве таких жидкостей протекают чрезвычайно быстро

и более интенсивно, чем во взрывчатых веществах, находящихся в смеси частиц твердых тел.

Несмотря на это, жидкие взрывчатые вещества пока еще не получили широкого применения на практике.

Удельная энергия взрывчатого вещества.

Всякий взрыв производит действие на окружающую среду. Это действие будет тем значительнее, чем больше энергия, выделившаяся при взрыве. Исходя из этого обстоятельства, можно разработать тот или иной способ определения энергии взрывчатого вещества. Простейшие приборы для определения энергии взрыва пороха, применявшиеся в прошлом, непригодны для испытания современных мощных взрывчатых веществ. Дело в том, что некоторые современные взрывчатые вещества отличаются не только значительной энергией взрыва, но и способностью выделять ее в течение очень небольшого промежутка времени. При этом возникает очень большое давление во взрывных газах: оно может доходить до 100 тысяч атмосфер и более. Такое давление во много раз превосходит пределы прочности самых прочных металлов. Под действием такого давления любой материал переходит в текучее состояние и испытывает значительные деформации даже при очень кратковременном действии его. А это значит, что создать прибор, который мог бы быть применен для определения энергии взрыва и не выходил бы из строя при первом же применении, невозможно.

Однако можно поставить задачу иначе, если деформации материала рассматривать как средство измерения силы взрыва. Именно этот способ и применяется в современных условиях.

Заряд определенной массы помещают в массивный свинцовый сосуд стандартной формы¹ и, закрыв его достаточно плотной и массивной пробкой (забойкой) из песка, производят взрыв. При взрыве свинцовый сосуд деформируется и его внутренний объем увеличивается (рис. 3). Это увеличение легко измерить, заполнив сосуд водой до и после взрыва.

Многочисленные опыты показали, что увеличение объема свинцового сосуда при взрыве является пропорциональным энергии, выделенной при взрыве. Этот вывод может быть получен также и теоретически.

1 Такой сосуд принято называть свинцовой бомбой или бомбой Траутса по имени ученого, впервые применявшего описываемый способ.

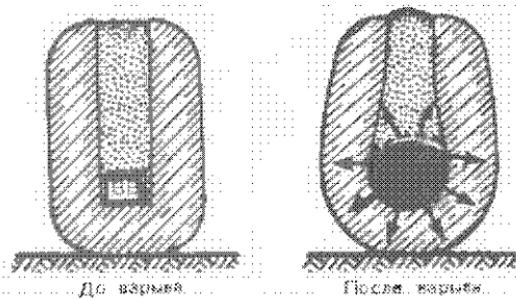


Рис. 3. Схема взрыва заряда в синтетической бомбе

Рассмотрим сначала случай очень небольшого увеличения объема шарообразного сосуда. Сила F будет равна произведению давления P взрывных газов на общую внутреннюю поверхность сферического сосуда:

$$F = PS.$$

Под действием этой силы радиус шара R увеличится на небольшую величину ΔR .

Работа расширяющегося газа A , равна, как и всякая механическая работа, произведению силы на путь:

$$A = F \Delta R.$$

Заменяя F его значением, установленным ранее, получаем

$$A = PS \Delta R.$$

Нетрудно видеть, что произведение

$$S \Delta R = \Delta V$$

является увеличением объема сосуда.

Отсюда можно сделать заключение, что

$$A = P \Delta V.$$

Увеличение объема сосуда будет продолжаться до тех пор, пока величина давления P не снизится до определенного предела, зависящего от прочности материала сосуда и его формы. Следовательно, при стандартных сосудах величину P можно считать постоянной. При таких условиях работа расширения сосуда будет пропорциональна увеличению его объема ΔV .

Работа, произведенная взрывными газами, будет тем больше,

чем больше масса заряда. Можно считать, что эта работа пропорциональна удельной энергии взрывчатого вещества, т.е. той энергии U_1 , которая содержится в единице массы этого вещества (т.е. в одном килограмме, грамме или иной единице), а также пропорциональна общей массе заряда q :

Следовательно,

$$U_1 q = A = P \Delta V.$$

Сравним два различных взрывчатых вещества, равных по размерам, и взорвем их в двух одинаковых сосудах. Пусть удельные энергии этих ВВ равны соответственно U_{11} и U_{12} , а увеличение объемов составило ΔV_1 и ΔV_2 .

Тогда можно написать:

$$U_{11} q_1 = P \Delta V_1;$$

$$U_{12} q_2 = P \Delta V_2.$$

Заряды обоих взрывчатых веществ следует брать одинакового размера и взрывать в одинаковых сосудах. Поэтому величина P в обоих равенствах будет одинакова.

Деля первое равенство на второе, можно сократить P и получим

$$U_{11} = U_{12} \frac{\Delta V_1 q_1}{\Delta V_2 q_2}.$$

Можно считать, что масса обоих зарядов, имеющих одинаковые размеры и, следовательно, одинаковый объем, относятся друг к другу как плотность соответствующих взрывчатых веществ τ_1 и τ_2 . Поэтому

$$U_{11} = U_{12} \frac{\Delta V_2 \tau_2}{\Delta V_1 \tau_1}.$$

Таким способом очень просто сравнить значения удельной энергии различных взрывчатых веществ друг с другом.

При подобных опытах необходимо иметь в виду, что не все взрывчатые вещества взрываются полностью, если они взяты в очень малом количестве. Поэтому в тех случаях, когда масса заряда недостаточна, можно производить взрывы нескольких зарядов с возрастающей массой.

Если при этом будет достигнута такая масса, которая обеспечивает необходимую полноценность реакции взрыва, то всякое дальнейшее увеличение заряда будет давать приращение объема

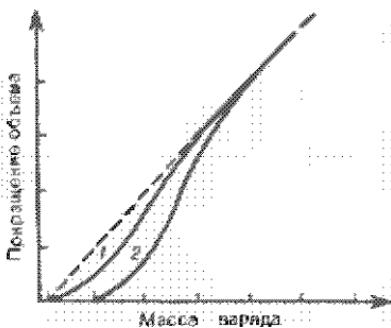


Рис. 4. График зависимости увеличения внутреннего объема свинцовой бомбы от массы заряда, взорванного в бомбе

при взрыве пропорционально массе заряда, а слишком малые заряды будут отступать от этой закономерности (рис. 4).

Иными словами, можно определять удельную энергию взрыва для зарядов различной массы и считать правильным такое значение удельной энергии, которое является максимальным и постоянным при дальнейшем увеличении массы зарядов.

Возбуждение взрыва

Многие взрывчатые вещества взрываются только при определенных и достаточно сильных воздействиях. Если такого воздействия нет, можно усомниться, действительно ли является это вещество взрывчатым или нет.

Вот, например, шашки тротила. Тротил прессуется в виде небольших цилиндриков и кирпичиков, внешний вид которых ничем не напоминает о том, какая огромная разрушительная сила таится в них. Случалось, что печь растапливали тротиловыми шашками и шашки спокойно горели, не производя никаких разрушений и давая такое количество теплоты, которое заметно превышало энергию взрыва.

Это объясняется постепенной отдачей энергии при горении в противоположность очень быстрому выделению энергии при взрыве.

Но такое использование тротиловых шашек может привести и к роковым последствиям. Если газы при расширении встретят препятствие (горящая шашка тротила окажется прижатой к ка-

кой-либо преграде), давление и температура станут быстро расти и горение может перейти в сильный взрыв.

Следовательно, взрыв возникает только при каком-либо определенном воздействии. В чем же состоит такое воздействие и как его обеспечить?

Чтобы вызвать взрыв какого-либо заряда, т.е. произвести инициирование взрыва химического взрывчатого вещества, необходимо вызвать реакцию взрывного разложения сначала в небольшой части этого заряда.

Всякая химическая реакция осуществляется при помощи соударения молекул. Но не всякое соударение вызывает перестройку молекулы в соответствии с той химической реакцией, которую мы хотим осуществить. Поэтому требуется некоторое время, чтобы все молекулы успели должным образом столкнуться друг с другом и изменить свое строение.

Если взорвется какая-нибудь очень малая часть заряда, то в ней выделится соответствующая энергия. Температура продуктов взрыва достигнет достаточно большой величины и они начнут действовать на взрывчатое вещество, окружающее место взрыва, разогревая его. В этом веществе начнется взрывная реакция.

Однако если взрыв первоначально захватил очень малый объем заряда, то передаваемая им энергия будет быстро рассеиваться и начальная очень высокая температура будет быстро снижаться. В результате этого не все молекулы, окружающие место первоначального взрыва, успеют перестроиться и отдать продуктам взрыва свою энергию. Поэтому при распространении взрывного процесса в заряде разложение взрывчатого вещества будет становиться все слабее и слабее и в конце концов совсем заглохнет.

Взрыв заряда химического взрывчатого вещества можно вызвать только тогда, когда взрывная реакция с самого начала захватывает определенную массу. Эта минимальная масса у взрывчатых веществ может быть весьма различной. Например, у азота свинца достаточно взорвать массу примерно в один миллиграмм и взрыв охватит весь заряд. У тротила минимальная масса составляет несколько долей грамма.

Есть малочувствительные взрывчатые вещества. Например, аммонийную¹ селитру в чистом виде обычно не считают взрывчатым веществом. Однако если в плотном массиве слежавшейся аммонийной селитры взорвать массу в несколько десятков килограммов, то это пролечет взрыв остальной части селитры.

Это и случилось в одной из стран Европы, где хранилось в виде

¹ Другое название — аммиачная.

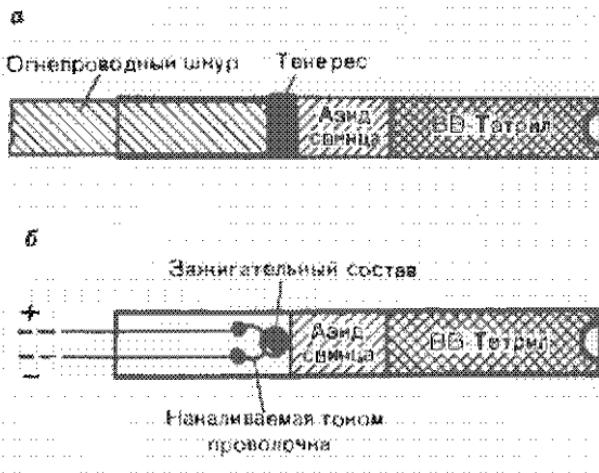


Рис. 5. Схема устройства:

а — взрывателя детонатора; б — электродетонатора

огромного сплошного штабеля около 11 000 т такой селитры. Селитра находилась под открытым небом и от воздействия дождей слежалась в плотный массив. При выдаче со склада того или иного количества селитры ее приходилось дробить взрывами небольших зарядов обычных взрывчатых веществ. Пока эти заряды оставались небольшими, их применение не приводило к каким-либо осложнениям. Но однажды было необходимо раздробить сразу сравнительно большой объем селитры и для этой цели взорвали увеличенный заряд, заложенный в массив селитры. Этот заряд оказался больше той минимальной массы, которая была нужна для возбуждения взрыва в слежавшемся массиве. В результате этого взорвались все 11 000 т аммонийной селитры. Разрушения достигли такого размера, которые можно сравнить с разрушениями после взрыва атомной бомбы малого калибра.

Каким же путем можно вызвать взрыв достаточно большой массы взрывчатого вещества внутри заряда?

Для этой цели применяют так называемые средства инициирования, оформленные обычно в виде детонаторов. Простейшими детонаторами являются такие, которые сами взрываются от огня, передаваемого при помощи огнепроводного шнуря.

Когда огонь попадает внутрь детонатора, он нагревает очень маленький заряд, чувствительного к воздействию взрывчатого

вещества. Если пламя достаточно интенсивно, оно очень быстро прогревает крупинку такого взрывчатого вещества и вызывает ее взрыв. Энергия этого взрыва воздействует на следующее звено детонатора — на крупный заряд менее чувствительного взрывчатого вещества, например, тетрила. Тетрил взрывается и уже своим действием может вызвать взрыв крупного тротилового заряда, внутри которого вставлен детонатор.

Импульс к взрыву детонатора можно осуществить также с помощью электрического тока, который пропускается через тонкую проволочку, помещенную внутри детонатора, называемого в этом случае электродетонатором (рис. 5, а, б). Ток нагревает проволочку и поджигает горючее вещество, которым покрыта проволочка. Вещество вспыхивает, и вспышка возбуждает взрыв в цепочке зарядов так же, как и при действии огнепроводного шнура (см. рис. 5).

Существуют также электроискровые детонаторы, где начало взрыва осуществляется электрической искрой.

Наконец, применяются детонаторы, где начало взрыву дает интенсивный удар бойка при помощи достаточно сильной пружины (по такому принципу воспламеняются пистоны в ружейных и револьверных патронах).

Чувствительность взрывчатых веществ

Инициирование взрыва ударом представляет интерес не только потому, что это явление может быть применено в каком-либо взрывательном устройстве. Взрыватели, т.е. приспособления, вызывающие взрыв, действующие при помощи механического удара, применяются во взрывном деле сравнительно редко. Удобнее производить взрывы при помощи *огнепроводящего шнура* или *электрического тока*.

Однако инициирование взрыва ударом можно рассматривать как простой и удобный способ для определения чувствительности взрывчатых веществ к различным механическим воздействиям.

Такое жидкое взрывчатое вещество, как нитроглицерин, невозможно перевозить в сосудах на автомашинах даже по лучшим дорогам. Малейший толчок, резкое торможение и нитроглицерин взрывается.

Зная чувствительность, можно судить о том, насколько то или иное взрывчатое вещество опасно при обращении с ним, например при транспортировании, заряжании шпуров, взрывных скважин и в других случаях.

Например, бронебойные снаряды имеют иногда разрывной заряд, необходимый для поражения техники и людей после пробивания снарядом брони. При ударе о броню снаряд наносит и, в свою очередь, испытывает удар чудовищной силы. И тем не менее находящееся в нем взрывчатое вещество не взрывается. Однако через очень небольшой промежуток времени под действием детонатора обеспечивается полноценный взрыв без всяких затруднений. Таким образом, маленький детонатор может оказаться сильнее, чем мощный удар тяжелого снаряда о первоклассную броню.

Для испытания взрывчатых веществ ударом существуют специальные установки. Они представляют собой так называемые копры, т.е. вертикальные стойки, вдоль которых может падать груз (рис. 6). Груз ударяет при помощи бойка стандартной формы по небольшому образцу взрывчатого вещества. Пока высота падения груза не превосходит некоторой определенной величины, образец взрывчатого вещества не взрывается ни при одном из многократных ударов. При дальнейшем увеличении высоты падения груза некоторая часть опытов заканчивается взрывом. По мере увеличения высоты падения груза взрывы возникают все чаще и чаще. Наконец, достигается такая высота, при падении с которой груз своим ударом вызывает взрывы при всех опытах (рис. 7).

Таким образом, чувствительность ВВ к взрыву при ударе выражается статистической закономерностью, т.е. такой закономерностью, которая выводится на основе массовых наблюдений. Эта закономерность не может быть выражена каким-либо определенным числом. Необходимо выражать результаты опытов таблицей или графиком, показывающим, как изменяется число взрывов от высоты при условии, что при каждой высоте производится определенное, достаточно большое число опытов.

Результаты таких исследований удобнее всего выражать относительным числом взрывов, т.е. частным от деления числа взрывов на число опытов при определенной высоте падения груза. Это частное может изменяться, если число опытов увеличивается. Однако при очень большом числе опытов случайные отклонения становятся незначительными, и относительное число взрывов по отношению ко всему числу опытов будет достаточно постоянным. Это предельное значение называется *вероятностью взрыва*. Вероятность взрыва является величиной, которая зависит от высоты падения груза, имеющего определенную массу. Эта зависимость, записанная в таблице или изображенная в виде графика, и является характеристикой чувствительности взрывчатого вещества.

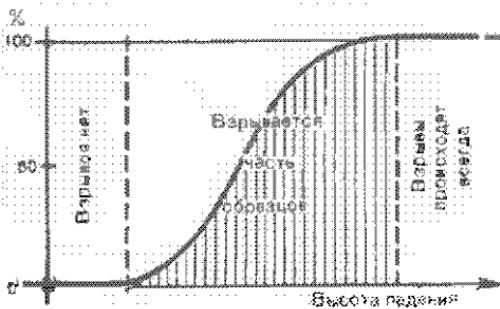
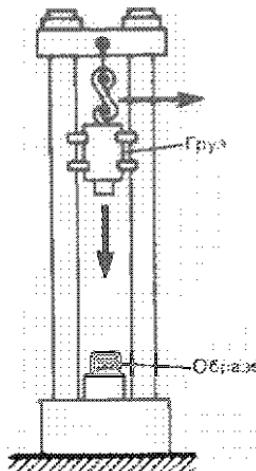


Рис. 6. Схема копра для испытания чувствительности взрывчатых веществ

Рис. 7. График зависимости относительного числа взрывов от высоты падения груза на копре

ства к удару при определенных условиях — массе падающего груза, форме и размерах образцов, подвергающихся испытанию.

Ознакомившись с техническими средствами определения и математическими способами выражения чувствительности взрывчатых веществ, следует глубже вникнуть в то, что происходит внутри массы взрывчатого вещества при ударе.

Ударяющее тело производит очень сильное давление на взрывчатое вещество. Если, например, груз массой 1 кг падает с высоты 1 м и, производя удар, сжимает образец взрывчатого вещества на 1 мм, то средняя сила при ударе оказывается во столько раз больше массы груза, во сколько раз высота падения превосходит деформацию образца. В рассматриваемом примере мы получим силу удара, равную 1000 кгс. Допустим, что площадь, воспринимающая силу удара, равна $1/4 \text{ см}^2$. В этом случае среднее давление при ударе составит $4000 \text{ кгс}/\text{см}^2$.

При такой нагрузке взрывчатое вещество уплотняется, а при уплотнении и сдвиге нагревается. Повышение температуры может в отдельных точках быть очень значительным; в этих точках и может произойти инициирование взрыва. Если таких точек достаточно много и они расположены близко друг к другу, то микроскопические зоны взрыва сливаются друг с другом и взрывной процесс распространяется на весь образец взрывчатого вещества.

Взрыв может произойти также и при нагревании. Если пламя прикоснется к взрывчатому веществу, то оно загорается и горит

более или менее спокойно, не вызывая взрыва. Объясняется это тем, что прогревается только поверхностный слой взрывчатого вещества, который немедленно разлагается, превращаясь в продукты взрыва, а высокое давление и высокая температура не передаются внутрь заряда.

Рассмотренные примеры показывают, что возникновение и распространение взрыва связаны с передачей через заряд мощного сжатия, приводящего к быстрому и сильному нагреванию взрывчатого вещества. Такое сжатие и нагрев могут быть вызваны газами, возникающими при взрыве какой-либо части заряда, например, под действием детонатора. Именно такой механизм передачи взрыва следует считать основным процессом, обеспечивающим полноценный взрыв применяемых на практике зарядов взрывчатых веществ.

Процесс передачи взрыва волной сжатия называется детонацией, а волна сжатия, вызывающая и передающая эту детонацию, — детонационной волной или волной детонации.

Гидродинамическая теория детонации

Взрывчатые вещества могут иметь самый различный химический состав и строение. При взрыве выделяются газы, химический состав которых может быть разнообразным. Однако на практике и в теории взрывного дела приходится сравнительно редко учитывать особенности химических реакций или особенности физического строения заряда. В основном все явления при взрыве можно рассматривать с единой точки зрения, исходя из определенных физических законов.

Это возможно потому, что определяющее значение при взрыве имеет волна детонации, распространяющаяся через заряд. Эта волна движется во взрывчатом веществе так, как если бы это вещество было сжимаемой жидкостью. Поэтому в основе теории взрыва всех взрывчатых веществ лежит гидродинамическая теория детонации.

Исходным условием гидродинамической теории детонации является то, что реакция взрывного разложения осуществляется в зоне, непосредственно примыкающей к фронту детонационной волны. Фронт детонационной волны представляет собой поверхность, отделяющую зону, где происходит реакция взрыва, от еще не захваченного взрывом взрывчатого вещества. Фронт волны детонации движется с очень большой скоростью в направлении, перпендикулярном к поверхности этого фронта. Непо-

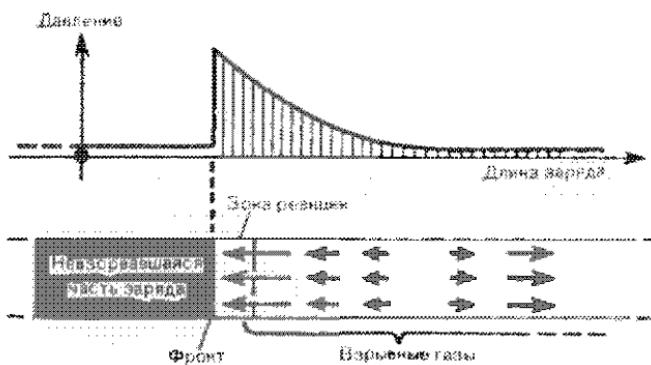


Рис. 8. Схема детонационной волны

средственно за фронтом волны температура и давление резко (скачкообразно) повышаются.

Именно этим объясняется, что реакции взрыва очень быстро протекают за фронтом волны детонации и полностью осуществляется в очень небольшом по толщине слое. Этот слой перемещается за фронтом волны детонации со скоростью этой волны и оставляет за собой раскаленные и имеющие высокое давление газы, стремящиеся расширяться и производящие механическое действие взрыва.

Таким образом, можно с некоторым приближением считать, что фронт волны детонации является границей между взрывчатым веществом, находящимся в первоначальном спокойном состоянии, и сильно сжатыми раскаленными взрывными газами (рис. 8).

Волна детонации распространяется с постоянной скоростью, зависящей от удельной энергии взрывчатого вещества. Если при инициировании взрыва происходит недостаточно полное разложение взрывчатого вещества, то скорость распространения волны детонации оказывается соответственно меньше своего нормального значения. Однако если взрыв не затухает, а развивается, полнота разложения взрывчатого вещества быстро возрастает и скорость детонации, увеличиваясь, приближается к своему постоянному значению.

Чтобы выразить в определенных числах особенности процесса детонации, необходимо учесть, что распространение волны детонации зависит, во-первых, от того, в какой мере изменяется

давление при расширении взрывных газов, и, во-вторых, от удельной энергии детонирующего взрывчатого вещества.

Изменение давления взрывных газов при изменении их объема выражается так называемым законом состояния. Этот закон в наиболее простой, хотя и несколько приближенной форме, был предложен в 1944 году советскими учеными Л.Д. Ландау и К.П. Станюковичем.

Его можно записать так:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^k,$$

где P_1 и P_2 — давления, соответствующие объемам V_1 и V_2 . Величина k характеризует степень жесткости взрывных газов. Чем больше эта величина, тем сильнее сопротивляется газ сжатию, тем быстрее растет его давление при уменьшении объема. Для газов, сжимаемых сравнительно медленно при небольших давлениях, можно принять, что $k = 1$. Тогда давление оказывается обратно пропорциональным объему газа. Это не что иное, как общеизвестный закон Бойля—Мариотта. При очень быстром сжатии взрывных газов, имеющих высокое давление, их сопротивление уменьшению объема оказывается весьма значительным. В соответствии с этим величина k возрастает. Л.Д. Ландау и К.П. Станюкович, исходя из теоретических соображений, установили, что приблизительно для всех химических взрывчатых веществ $k = 3$.

Это значит, что при изменении объема в 2 раза давление изменяется в 8 раз.

Скорость волны детонации должна быть тем больше, чем большее удельная энергия взрыва U_1 и чем более "жесткими" являются взрывные газы, т.е. чем больше величина k .

Более детальные расчеты приводят к тому, что скорость волны оказывается равной

$$D = \sqrt{2(k^2 - 1)U_1 g},$$

где g — ускорение свободного падения тела, равное $\sim 10 \text{ м/с}^2$.

Оно введено, чтобы удельную энергию, обычно отнесенную к единице массы заряда, отнести к технической единице массы.

Если учесть, что $k = 3$, то можно написать

$$D = 4\sqrt{10U_1} = 12,6\sqrt{U_1}.$$

Для тротила удельная энергия взрыва равна приблизительно 400 000 кгм/кг, или условно 400 000 м. Эта величина, выраженная

ная в метрах, означает следующее. Если бы энергию взрыва полностью использовать для подбрасывания вверх взрывных газов (учитывая действие силы тяжести), то этой энергии хватило бы, чтобы поднять их на высоту 400 000 м в однородном поле силы тяжести (поле силы тяжести Земли неоднородно и при подъеме на каждые 32 км масса любого тела уменьшается на 1%).

При удельной энергии, равной 400 000 кгм/кг, скорость волны детонации будет равна

$$D = 12,6 \sqrt{400\,000} \approx 8000 \text{ м/с.}$$

Давление взрывных газов P_D за фронтом волны детонации, так же как и скорость детонации, тем больше, чем значительнее величины k и U_1 . Кроме того, это давление должно быть прямо пропорционально плотности взрывчатого вещества ρ , выраженной в технических единицах массы, отнесенных к 1 м³.

Подробные расчеты выражены формулой

$$P_D = 2(k-1)\rho U_1 g = 4\rho U_1 g.$$

Величина $\rho g = \gamma$ является плотностью взрывчатого вещества и выражена в килограммах, отнесенных к 1 м³. Поэтому

$$P_D = 4\gamma U_1.$$

Для тротила можно принять $\gamma = 1600 \text{ кг/м}^3$,

$$P_D = 4 \cdot 1600 \cdot 400\,000 = 2\,560\,000\,000 \text{ кгс/м}^2.$$

Эти расчеты показывают, что первоначальные, наиболее сильные давления при взрыве обычного взрывчатого вещества оказываются чрезвычайно большими и во много раз превосходят значения временного сопротивления на раздавливание всех известных материалов и сред. Именно этим и обусловлено разрушающее действие взрыва.

Очень высокое давление за фронтом волны детонации приводит к тому, что взрывные газы устремляются со скоростью v в ту же сторону, куда движется волна детонации.

Чтобы определить v , представим себе удлиненный заряд, поперечное сечение которого равно единице. Допустим, что этот заряд имеет достаточно большую длину. Тогда за единицу времени (1 с) волна детонации пройдет вдоль заряда путь, равный D . Скорость, сообщаемая взрывному газу, будет равна, как указывалось выше, величине v . Масса газа будет равна массе сдетонированного за 1 с взрывчатого вещества. Эта масса составляет величину $D\rho$.

Произведение массы на скорость называется **количеством движения**. Оно равно в рассматриваемых условиях $D\rho u$.

В соответствии с основными законами механики количество движения равно **импульсу силы**, т.е. произведению силы, вызывающей движение, на время ее действия. Время действия в рассматриваемой задаче равно единице, а сила равна P_D . Следовательно, импульс равен тоже P_D .

Итак,

$$P_D = D\rho u,$$

отсюда

$$u = \frac{P_D}{D\rho}.$$

Вместо P_D и D можно подставить их значения в соответствии с формулами, приведенными выше.

Тогда окажется, что

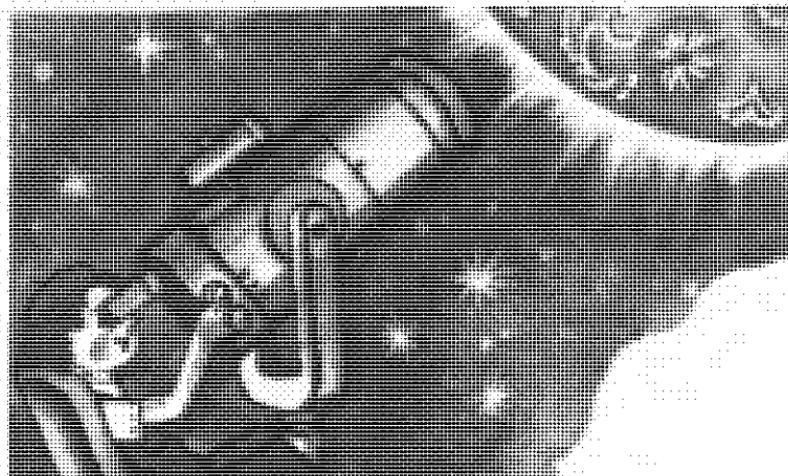
$$u = \sqrt{2 \frac{k-1}{k+1} U_1 g}.$$

Учитывая, что $k = 3$ и $g \approx 10 \text{ м/с}^2$,

$$u = \sqrt{U_1 g} = 3,16 \sqrt{U_1}.$$

Сравнивая формулы для расчета u и D , можно установить, что

$$u = \frac{D}{k+1} = \frac{1}{4} D.$$



Расширение взрывных газов

В каких бы условиях не происходил взрыв, он слышен обычно на далекие расстояния: доносится или четкий удар, или глухой гул, или неопределенный рокот. Бнимательный практик взрывного дела мог бы назвать и охарактеризовать множество звуков, порождаемых взрывом. Однако дело здесь не только в субъективных ощущениях. Звук взрыва говорит о многом. По звуку взрыва можно судить о том, в какой мере полноценно детонировал заряд, как распределилась энергия взрыва между породой и воздухом, как произошел выброс породы.

Звук взрыва — это первый сигнал, позволяющий контролировать качество взрывных работ.

Каким образом доносится до нас звук взрыва? Что приносит этот звук, какие происходят при этом физические явления? Почему иногда вместе со звуком взрыва восприни-

ВЗРЫВ В ВОЗДУХЕ

мается сильный удар? В какой мере связаны разрушения, производимые взрывом, со звуком этого взрыва?

Такие вопросы возникают неизбежно при анализе действия любого взрыва, и чтобы разобраться в этих вопросах, необходимо прежде всего выяснить, как энергия взрыва передается воздуху и как она распространяется через воздух.

Начинается этот процесс с расширения взрывных газов. При взрыве в воздухе взрывные газы, не встречая заметного сопротивления со стороны воздуха, находящегося возле свободных поверхностей заряда, начинают интенсивно расширяться по направлениям, перпендикулярным к этим поверхностям заряда. Скорость этого расширения у молекул газов, разлетающихся с поверхности заряда, наибольшая, следующие за ними молекулы движутся все медленнее. Можно с некоторым приближением считать, что взрывной газ расширяется подобно сильно сжатой и мгновенно освобожденной пружине. Скорость наиболее быстрых молекул нарастает до тех пор, пока к ним передается энергия изнутри массы газов. Это возможно до тех пор, пока скорость движения наиболее быстрых молекул не достигнет некоторой предельной величины c , с которой передается энергия во взрывном газе. Эта величина — скорость звука.

Скорость звука можно определить в рассматриваемых условиях взрыва, исходя из величин, определенных ранее. Волна детонации распространяется по взрывчатому веществу вследствие передачи энергии от сильно сжатых взрывных газов еще не детонировавшей части заряда. Сами газы движутся со скоростью u . Волна детонации обгоняет их и движется со скоростью D . Почему волна детонации может обогнать взрывные газы? Очевидно, потому, что энергия этих газов передается от них вслед за фронтом волны со скоростью звука c . Иначе говоря, скорость детонации превосходит скорость движения газов u на величину скорости звука c .

На этом основании можно написать, что

$$D = u + c$$

или

$$c = D - u.$$

Используя для расчета D и u ранее полученные формулы, можно записать так:

$$c = D \frac{k}{k + 1}$$

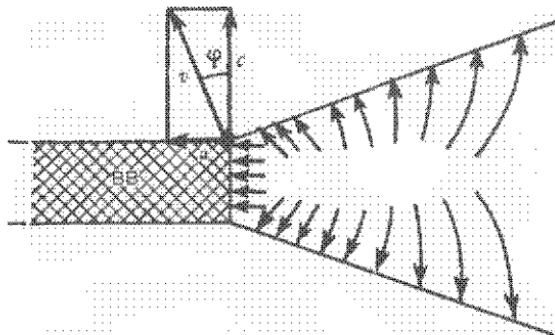


Рис. 9. Схема движения взрывных газов при взрыве удлиненного заряда ВВ

или

$$c = k u.$$

Так как для взрывных газов $k = 3$, то $c = 3 u$.

Определив скорость звука c во взрывных газах, возвратимся к взрыву удлиненного заряда. Ранее было установлено, что боковое расширение продуктов взрыва происходит так, что наиболее быстрые молекулы получают скорость движения (в направлении, перпендикулярном к первоначальной боковой поверхности заряда), равную скорости звука c . Кроме того, эти молекулы движутся в сторону распространения детонации со скоростью u (рис. 9).

Обе скорости складываются в соответствии с правилом параллелограмма скоростей. Получаемая при этом сложении так называемая результирующая скорость v и является скоростью реального движения переднего фронта молекул взрывных газов, расширяющихся в результате взрыва. Эти молекулы несут на себе значительно больше энергии, чем остальные, и их движение в известной степени характеризует разрушающее действие взрыва. Поэтому это движение заслуживает более подробного рассмотрения.

При сложении скоростей c и u направление результирующей скорости v отклоняется от перпендикуляра в сторону распространения детонации на некоторый угол $φ$. Этот угол образован векторами скоростей c и u . Из этого условия вытекает, что

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{u}{c} = \frac{1}{4}.$$

При таком значении тангенса угол $\varphi = 14^\circ 5'$. Это достаточно большой угол, он виден при взрыве настолько заметно, что для этого не требуется каких-либо особых приборов.

Впрочем, обнаружить какую-либо закономерность при взрыве не так-то просто. Огромная сила взрыва не позволяет расположить вблизи места взрыва какие-либо приборы. Взрыв требует особых, непривычных способов исследования. Эти способы бывают чрезвычайно просты, но требуют должного внимания и определенных знаний.

Самый простой способ обнаружить направление расширения взрывных газов сводится к следующему. Необходимо взять удлиненный заряд ВВ. В простейшем случае это детонирующий шнур. Еще лучше взять специально изготовленные палочки из тротила, которые можно уложить прямолинейной цепочкой.

Удлиненный заряд кладут на достаточно толстый лист металла. Толщина листа должна быть такой, чтобы при взрыве он не был пробит насеквоздь.

Инициирование взрыва производится с одного из концов заряда. После взрыва на металлическом листе получается вмятина, около которой на металле остаются следы, прочерченные расширявшимися газами. Следы показывают те направления, по которым эти газы двигались. Применяя транспортир, можно измерить угол непосредственно на поверхности металла.

Чтобы выяснить независимость угла φ от деталей эксперимента, можно несколько усложнить опыт. Для этого необходимо изготовить заряд ВВ в форме кольца и установить детонатор в любом месте его. Заряд кладут на металлический лист и взрывают. После взрыва можно увидеть на металле отпечаток кольцевого заряда в форме круга. Кроме этого отпечатка на металлическом листе обнаруживается еще круг меньшего радиуса. Этот круг возникает под действием наиболее быстрых молекул взрывных газов, действие которых на металл происходит по направлениям, отклоненным от радиусов кольцевого заряда на угол φ .

Если начертить внутри круга много линий, отклоняющихся от радиусов на некоторый сравнительно небольшой угол, то можно увидеть, что эти линии будут пересекаться, образуя небольшой круг (*рис. 10*). При этом легко доказать, что радиус малого круга r , деленный на радиус большого круга R , равен тангенсу угла отклонений линий от соответствующих радиусов. Следовательно, если при экспериментальном взрыве измерить со-

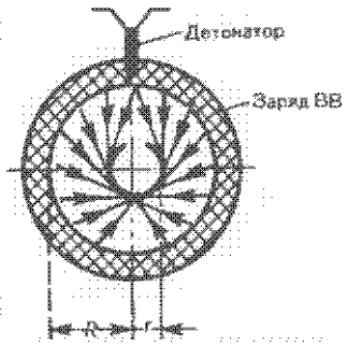


Рис. 10. Схема движения газов при взрыве кольцевого заряда ВВ

ответствующие радиусы, то можно написать

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{r}{R}.$$

Если учесть, что $\operatorname{tg} \psi = \frac{u}{c}$, а также, что $\frac{c}{u} = k$, как это было доказано выше, то можно написать

$$k = \frac{R}{r}.$$

Таким образом, при помощи простых опытов можно установить важную величину, характеризующую сжимаемость взрывных газов при высоких давлениях, возникающих при взрыве, а также движение взрывных газов и их действие в воздухе вблизи места взрыва.

Данный способ является далеко не единственным при определении соотношения между скоростью звука и скоростью движения взрывных газов. Можно, например, уложить на металлическом листе удлиненный заряд ВВ в виде буквы Г. При инициировании взрыва такого заряда с одного из его концов окажется, что после взрыва на листе металла помимо заряда отпечатывается линия, идущая внутри угла и отклоняющаяся от биссектрисы этого угла как раз на угол ψ (рис. 11).

Эти способы определения угла ψ и, как следствие, величины значения постоянной k дают близкие величины для различных взрывчатых веществ средней и повышенной мощности. При этом с достаточной степенью точности можно считать, что

$$k = 3,$$

как это было принято Л.Д. Ландау и К.П. Станюковичем на основе теоретических соображений.

Для того чтобы на основании гидродинамической теории детонации производить различные расчеты, необходимо помимо величины k знать также какую-либо из скоростей D , u или c , характеризующих взрыва. В отличие от величины k , скорости D , u и c не являются одинаковыми для различных взрывчатых веществ. Поэтому их нельзя установить на все случаи заранее

и необходимо измерять для каждого взрывчатого вещества отдельно.

Конечно, значения D и c можно определить, зная удельную энергию взрыва U_1 , по формулам, которые были приведены выше. Установление абсолютного значения U_1 хотя бы для одного какого-либо взрывчатого вещества необходимо для того, чтобы потом путем сравнения объемов в свинцовой бомбе определить U_1 для других взрывчатых веществ.

Наиболее простой путь для решения такой задачи — это расчет U_1 исходя из *скорости распространения детонации* D . Для этого можно применить приведенную выше формулу

$$D = 12,6 \sqrt{U_1},$$

откуда

$$U_1 = \left(\frac{D}{12,6} \right)^2.$$

Если D выражено в метрах в секунду, то величина U_1 получается в килограммометрах, отнесенных к килограмму взрывчатого вещества.

Величину D можно измерить фотографируя детонацию длинного заряда соответствующего взрывчатого вещества при помощи киносъемочного аппарата, предназначенного для высокоскоростной съемки. В настоящее время существуют киносъемочные аппараты, дающие миллион и более кадров в секунду. За одну миллионную долю секунды (микросекунду) детонация, распространяющаяся со скоростью 8000 м/с, пройдет расстояние, равное 8 мм. Поэтому измерить скорость детонации можно, фотографируя даже очень небольшие заряды при помощи ускоренной киносъемки и без дополнительного освещения. Движение волны детонации отлично видно по яркому свечению взрывных газов. Для удобства определения расстояния, пройденного

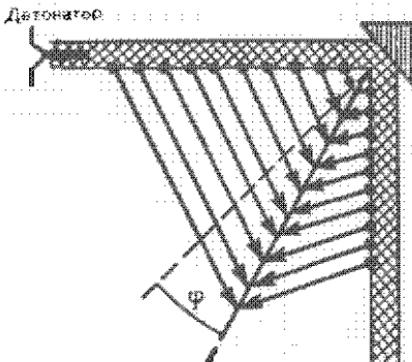


Рис. 11. Схема движения газов при взрыве заряда ВВ, имеющего форму буквы Г

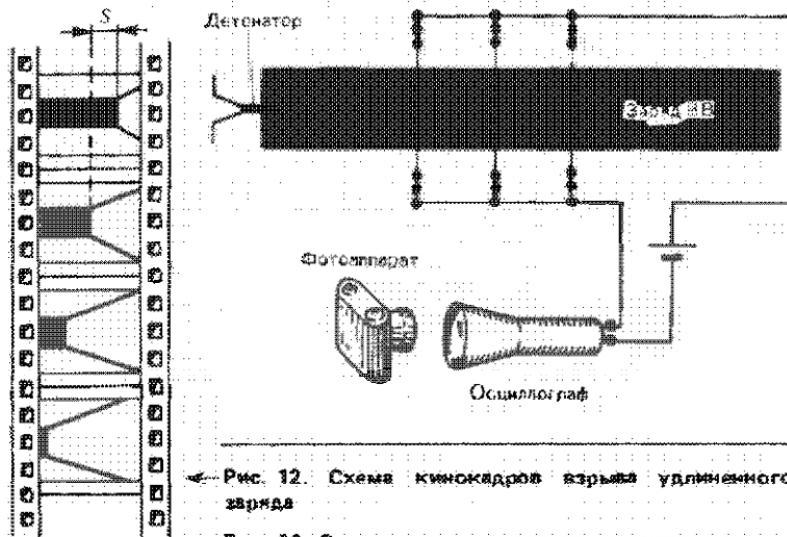


Рис. 12. Схема кинокадров взрыва удлиненного заряда

Рис. 13. Схема установки для определения скорости детонации заряда ВВ

волной детонации, можно установить вблизи заряда масштаб, разделенный на сантиметры.

Зная время t прохождения одного кадра и путь s волны детонации за это время, можно определить скорость волны детонации (рис. 12):

$$D = \frac{s}{t}$$

Скорость волны детонации можно определить и иными способами. Например, на поверхности заряда можно укрепить тонкие проволочки или полоски фольги, по которым пропускать электрический ток, регистрируемый при помощи осциллографа. При распространении волны детонации по заряду взрывные газы будут разрывать эти проволочки и ток будет прерываться. Осциллограф точно отметит моменты размыкания тока. Таким путем можно измерить время распространения детонации и, используя приведенную выше формулу, определить скорость детонации D (рис. 13).

Таким путем при помощи сравнительно простых и достаточно точных измерений можно установить наиболее существенные характеристики взрывчатых веществ.

Однако есть и еще ряд особенностей, без выяснения которых понимание взрыва будет неполным.

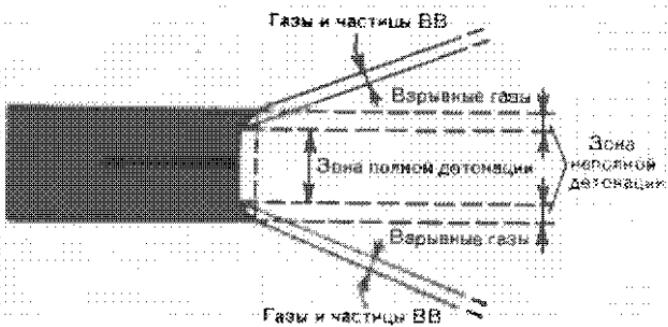


Рис. 14. Схема взрыва удлиненного заряда с неполной детонацией поверхностного слоя взрывчатого вещества

Вернемся к взрыву удлиненного заряда. Сразу же после прохождения волны детонации объем газов быстро растет, а давление и температура в них очень быстро уменьшаются. Вследствие этого близко от поверхности заряда взрывчатое вещество не успевает полностью разложиться. Энергия взрыва в поверхностном слое выделяется только частично (рис. 14).

Если удлиненный заряд имеет небольшой диаметр, то удельная энергия, выделяемая при взрыве его, будет меньше, чем при взрыве заряда с большим диаметром. Поэтому с уменьшением удельной энергии взрыва уменьшается и скорость детонации.

Постепенно уменьшая диаметр заряда, можно получить такую величину диаметра, при которой детонация затухнет совсем и взрыв заряда окажется невозможным.

Значение предельного диаметра удлиненного заряда, называемого обычно *критическим диаметром заряда*, при котором исчезает детонация, зависит от химического состава взрывчатого вещества.

Критический диаметр — очень важная характеристика взрывчатого вещества. Чем меньше критический диаметр, тем чувствительнее взрывчатое вещество к инициированию при ударе или интенсивном нагревании. Например, для тротила критический диаметр равен 5–7 мм. Для азida свинца предельный диаметр значительно меньше и составляет десятые доли миллиметра. В соответствии с этим у азida свинца полноценный взрыв может осуществляться при выделении энергии в ничтожном объеме. Этим объясняется высокая чувствительность азida свинца к инициированию при ударе или нагревании. Именно поэтому

азид свинца используется в детонаторах как первое звено в цепочке зарядов, в которых развивается детонация.

Если необходимо обеспечить взрыв взрывчатого вещества, малочувствительного к взрыву, т.е. имеющего большой критический диаметр, то помимо детонатора необходимо применять еще промежуточные заряды в виде одной или нескольких шашек тетрила.

Все сказанное относится прежде всего к зарядам, взрываемым в воздухе. Иначе обстоит дело, если заряд заключен в прочную оболочку из достаточно плотного материала или находится внутри плотной среды, например в скале.

При наличии плотной оболочки, все выходы из которой закрыты массивной забойкой, взрывные газы не могут свободно и быстро расширяться. В результате этого способность воспринимать инициирование взрыва и передавать детонацию на весь заряд существенно возрастет. Даже заряды небольших размеров, например такие заряды, которые помещаются внутри углублений (штурпов) диаметром в несколько сантиметров, могут взрываться, практически полностью выделяя свою энергию.

Для обеспечения полноты взрыва необходимо только плотно забить выходное отверстие шпура глинистым грунтом. Отсюда и возникло название забойка, характеризующее степень изоляции взрывчатого вещества от атмосферного воздуха.

Разлет взрывных газов фигуриных зарядов в воздухе

Рассматривая движение взрывных газов и объясняя это движение на основе гидродинамической теории детонации, становится ясно, что наибольшая энергия переносится молекулами, летящими с поверхности заряда. Если даже в поверхностном слое заряда детонация была неполной и выделилась не вся энергия взрывчатого вещества, все равно частицам поверхностного слоя от остальных газов передается значительная энергия и эти частицы определяют основной характер действия взрыва.

Частицы поверхностного слоя движутся по направлениям, которые определяются сложением двух скоростей. Первая скорость, приобретаемая под действием волны детонации, направлена по линии, идущей от места инициирования, т.е. от детонатора к той точке поверхности заряда, где рассматривается движение взрывных газов. Вторая скорость, равная скорости звука, с превосходящая скорость v в 3 раза, направлена перпендикулярно к поверхности заряда (рис. 15).

При таких условиях взрывные газы движутся в основном перпендикулярно к поверхности заряда, отклоняясь несколько в сторону, противоположную месту инициирования взрыва.

Картину разлета взрывных газов очень хорошо можно увидеть, если в темноте сфотографировать взрыв кубической шашки взрывчатого вещества, свободно подвешенной в воздухе. Взрывные газы, находящиеся в раскаленном состоянии, интенсивно светятся и на фотоизображении оставляют свои следы в виде ярких огненных факелов. Если шашка имеет форму, близкую к кубу, то пламя взрыва получает крестообразный вид. Если заряд имеет треугольное сечение, то обнаруживаются три факела взрывных газов.

Характерной особенностью такого разлета продуктов взрыва является то, что в пространстве, примыкающем к исходящим углам и ребрам заряда, взрывные газы не распространяются. В этих местах действие взрыва практически отсутствует. Здесь имеются своеобразные защитные зоны. Наоборот, против средних частей граней заряда, где идет наиболее мощный поток взрывных газов, действие взрыва проявляется интенсивно. Здесь происходит так называемое *направленное действие взрыва*. Это явление имеет большое теоретическое и практическое значение. Оно позволяет управлять действием взрыва путем выбора формы заряда и места инициирования его.

Эта особенность имеет также большое значение при планировании зданий относительно друг друга, в которых осуществляется взрывоопасное производство или хранятся опасные взрывчатые вещества.

При сильном взрыве стены разрушаются и осколки разлетаются в основном перпендикулярно к плоскости стен. Если отмечать на плане зоны разлета этих осколков, получится ярко выраженная крестообразная фигура. Зона наиболее сильного поражения осколками будет находиться против средней части стен. Наоборот, около исходящих углов здания окажутся защитные

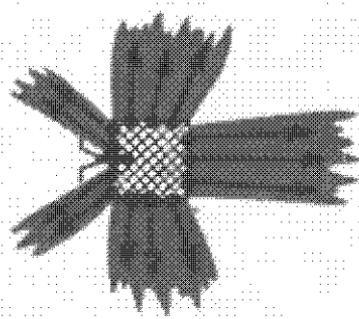


Рис. 15. Схема разлета взрывных газов кубического заряда с детонатором, расположенным в центре одной из его граней.

зоны, где действие взрыва практически отсутствует. Учитывая направленное действие взрыва, хранилища взрывчатых веществ и помещения, где находятся взрывоопасные установки, надо располагать так, чтобы они находились в защитных зонах по отношению друг к другу.

Быстрее второй космической

Необычные, неожиданные, страшные действия может произвести слабый, еле слышный взрыв совсем незначительного заряда. Маленький детонатор, взорвавшийся неожиданно среди угля в камине, убил девушку...

Вот здесь-то ученые впервые более внимательно отнеслись к неожиданным проявлениям взрыва и стали изучать особую форму направленного взрыва, возникающую под действием кумуляции. Однако до Великой Отечественной войны это явление рассматривалось как нечто необычное и его практическое значение недооценивалось.

Во время Великой Отечественной войны ученые обратились к этому явлению, когда стали создавать особые кумулятивные снаряды, бомбы для борьбы с фашистскими танками. Эти средства поражений с поразительной легкостью пронизывали самую прочную броню танка ослепительной кумулятивной струей, возникающей при взрыве. Эта струя поджигала горючее, вызывала взрыв боеприпасов, уничтожала оборудование танка.

Эффективность применения кумулятивного заряда поразительна: ведь энергия взрывных газов автоматически концентрируется в тонкой кумулятивной струе, которая может иметь скорость, превышающую не только первую космическую скорость, равную 8 км/с, но и вторую — 11,2 км/с.

Обычно в природе всякое движение осуществляется так, что энергия из мест, где она сконцентрирована в более значительной степени, переходит в места, где концентрация энергии меньше. При взрыве эта закономерность соблюдается тоже: взрывные газы движутся из места, где их давление больше, туда, где давление меньше. Энергия, выделенная при взрыве, быстро рассеивается и температура взрывных газов постепенно приближается к температуре окружающей среды.

Направленное действие взрыва в целом не изменяет этой закономерности. Однако можно создать такие условия, когда с помощью направленного действия взрыва получается необычайный результат — создается более высокое давление, более

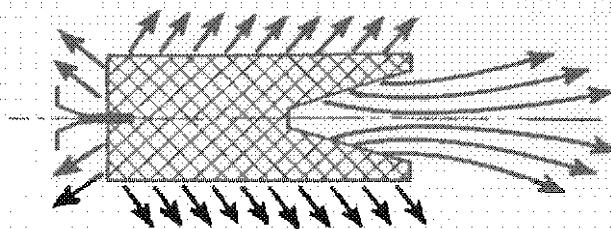


Рис. 16. Схема кумуляции взрывных газов

высокая температура и более высокая скорость движения взрывных газов.

Для получения такого результата необходимо применить заряд с выемкой той или иной формы. При взрыве взрывные газы устремляются в основном перпендикулярно к поверхности выемки, к ее центральной оси. Сходящиеся струи газов соударяются друг с другом и образуют очень мощный газовый поток, направленный вдоль оси выемки. Этот поток называется *кумулятивной струей*, выемка в заряде, вызывающая формирование такой струи, называется *кумулятивной выемкой*, а все явление — *кумуляцией*, т.е. собиранием энергии взрыва, повышением ее концентрации (рис. 16).

Газовая кумулятивная струя имеет очень высокую плотность. Скорость ее движения заметно выше скорости расширения взрывных газов. Однако газовая кумулятивная струя, едва успев образоваться, немедленно после этого быстро расширяется. Ее плотность, давление и скорость быстро снижаются. Поэтому кумуляция взрывных газов не может считаться наиболее ярким и сильным проявлением повышенной концентрации энергии неправильного взрыва.

Явление кумуляции можно существенно усилить и сделать более устойчивым, если осуществить кумулятивную струю не из взрывных газов, а из металла. Это осуществляется лучше всего при наличии в заряде конической кумулятивной выемки. Выемка снабжается металлической облицовкой, плотно прилегающей к поверхности взрывчатого вещества. Если облицовка изготовлена из стали, то ее толщина должна составлять примерно 1/30—1/60 часть диаметра отверстия кумулятивной выемки (рис. 17).

При взрыве металл облицовки с такой силой сжимается под действием взрывных газов, что внутри металла возникают дав-



Рис. 17. Схема кумулятивного заряда с конической выемкой и металлической облицовкой поверхности этой выемки

Рис. 18. Схема формирования металлической кумулятивной струи

ления, измеряемые миллионами атмосфер. Металл при таких условиях начинает течь подобно жидкости, потому что давление существенно превосходит временное сопротивление любого самого прочного металла. В результате этого из сжимающейся массы металла выплескивается по оси выемки тонкая струя металла, движущаяся необычайно быстро (рис. 18).

Расчеты, выполненные на основе гидродинамической теории кумуляции, приводят к следующим формулам. Скорость кумулятивной струи

$$v_k = v_0 \left(\frac{1}{\delta \cos \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \right),$$

где α — угол между образующими конической кумулятивной выемки и ее осью; v_0 — скорость, сообщаемая взрывными газами металлу облицовки кумулятивной выемки. Величину v_0 можно определить следующим способом. Обозначим толщину облицовки δ_0 и плотность металла облицовки ρ_0 . Примыкающее к облицовке взрывчатое вещество имеет среднюю толщину $\delta_{\text{вв}}$ и плотность $\rho_{\text{вв}}$.

Примем, что снаружи кумулятивный заряд также имеет оболочку из того же материала и той же толщины, что и кумулятивная выемка.

При таких условиях на основании расчета можно принять, что

$$v_0 = 2 \sqrt{U_1 g} \sqrt{\frac{1}{1 + 2 \frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_{\text{вв}} \delta_{\text{вв}}}}}$$

Если заряд тротиловый, а облицовка стальная, то $2\sqrt{\rho_0/\rho_{\text{BB}}} = 4000 \text{ м/с}$.

Допустим, что

$$2\rho_0/\rho_{\text{BB}} = 10, \delta_{\rho}/\delta_{\text{BB}} = 0,1.$$

Тогда $v_0 = 2300 \text{ м/с}$.

Если считать, что $\alpha = 15^\circ$, то $\sin \alpha = 0,26$; $\tan \alpha = 0,27$. Тогда, согласно формуле, приведенной выше,

$$v_k = 17600 \text{ м/с} = 17,6 \text{ км/с}.$$

Это очень большая скорость — более чем вдвое превышающая первую космическую скорость.

Делая выемки с очень малыми углами, а также ряд вспомогательных приспособлений и выпуская кумулятивную струю в стеклянную трубку, в которой нет воздуха, можно достигнуть скорости этой струи до 100 км/с. Такой скорости не достигали до сих пор ни один снаряд и ни одна ракета.

Если кумулятивная струя движется в воздухе сравнительно недолго, то она интенсивно разрушается и сгорает в воздухе подобно тому, как это происходит с метеоритами. Устойчивые струи в воздухе получаются при скоростях v_k , заметно меньших, чем те рекордные величины, которые были приведены выше. Эти скорости находятся в пределах 5—10 км/с.

Кумулятивная струя, ударяясь о преграду, производит на нее чрезвычайно большое давление, которое составляет, например, при ударе струи из металла плотностью ρ_0 по преграде из такого же металла величину

$$P_k = \frac{1}{4} v_k^2 \rho_0.$$

Эта формула получается на основе гидродинамической теории, при которой кумулятивная струя уподобляется струе жидкости, а преграда — слою жидкости.

Примем, что преграда стальная. Тогда

$$\rho_0 = 7800 \text{ кг/м}^3$$

Допустим, что $v_k = 10000 \text{ м/с}$. Тогда

$$P_k = 2000000000 \text{ кгс/м}^2 = 2000000 \text{ кгс/см}^2.$$

*Техническая единица массы равна 9,81 кг.

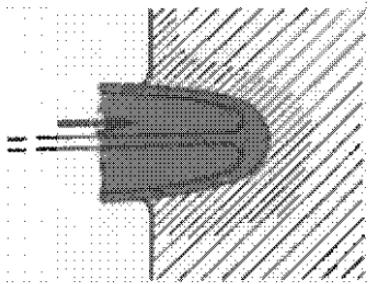


Рис. 19. Схема пробивания преграды кумулятивной струй

При давлении в миллион килограммов на квадратный сантиметр металл становится подвижным, как жидкость, и кумулятивная струя пробивает в нем отверстие, диаметр которого примерно в 10 раз больше диаметра кумулятивной струи (рис. 19).

Толщина пробиваемого слоя, согласно гидродинамической теории (формула Лаврентьева-Тейлора),

$$B = L \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_n}},$$

где ρ_0 — плотность материала струи, а ρ_n — плотность преграды.

Длина кумулятивной струи L должна теоретически равняться длине образующей кумулятивной выемки. Фактически она оказывается нередко значительно больше. Это обусловлено тем обстоятельством, что при полете кумулятивной струи ее головная часть имеет более значительную скорость, чем ее хвостовая. Поэтому струя в полете растягивается и ее пробивная способность растет.

Обычно кумулятивная струя достигает наибольшей значительной пробивной силы на расстоянии от заряда, равном примерно двум диаметрам отверстия кумулятивной выемки. При этом струя способна пробить стальную броню, в 3 раза и более превосходящую по толщине диаметр отверстия кумулятивной выемки. На более значительных расстояниях от заряда струя начинает разрушаться и быстро теряет свою пробивную силу.

Если выемка имеет небольшую глубину, то при взрыве образуется короткая кумулятивная струя, движущаяся сравнительно медленно. Она пробивает небольшие по толщине преграды. Однако в этом случае разрушение струи в полете протекает значительно медленнее и струя сохраняет пробивное действие на расстояниях, в сотни раз превышающих диаметр кумулятивной выемки.

Примером таких зарядов с неглубокими кумулятивными выемками являются обычные детонаторы и электродетонаторы в металлических оболочках с углублением в торцовой части.

При взрыве таких детонаторов возникают очень маленькие кумулятивные струи, имеющие форму кусочков металла разме-

ром 1–2 мм. Если оболочка детонатора медная, то возникающая при его взрыве кумулятивная струйка сохраняет сильное пробивное действие на расстоянии до 5 м. В гражданской взрывной технике кумулятивные заряды применяются сравнительно редко. Их мощное пробивное действие пока еще не нашло достаточно широкого применения.

Однако несомненно, что кумулятивные заряды могут быть полезными в ряде случаев. При помощи кумулятивных зарядов, взрываемых последовательно на поверхности, можно пробивать шпуры в самых прочных скальных породах. При этом нужно после каждого взрыва расчищать образующийся штур от мелко-раздробленной породы, чтобы следующий взрыв действовал глубже на еще неразрушенную скалу. При помощи кумулятивных зарядов можно также пробивать отверстия в стальных и железобетонных плитах и дробить крупные камни из твердых горных пород.

Впрочем, говоря о кумулятивных взрывах, нельзя ограничиваться только сравнительно небольшими взрывами, используемыми в технике. В последнее десятилетие было установлено, что в некоторых грандиозных по своему масштабу космических явлениях также наблюдаются своеобразные проявления кумуляции. В космическом пространстве, на различных расстояниях от нашей солнечной системы, наблюдаются, как известно, огромные скопления звезд, называемые галактиками. Некоторые из этих галактик испускают мощные радиоволны. Их называют радиогалактиками. Ближайшей к нам радиогалактикой является галактика, обозначенная астрономами M82. Из нее выброшен ряд водородных струй (предположительно 1,5 миллиона лет тому назад). Головные части этих струй имеют скорость, доходящую до 3000 км/с.

Похожие струи можно наблюдать в других радиогалактиках (M87, 3C48, 3C273, 3C275, NGK4651). У последней галактики наблюдаются две струи, направленные в противоположные стороны и имеющие длину около 50 000 световых лет.

Не вникая здесь в более подробный анализ этих интереснейших явлений, можно лишь отметить, что грандиозные выбросы направленных газовых струй в дальнем космосе можно также рассматривать как проявление закономерностей кумулятивного взрыва.

Среди различных практических приложений кумулятивного взрыва в технике особое значение приобрел способ сварки металлов и других материалов при помощи кумуляции. Такая сварка осуществляется следующим способом. Наиболее распро-

странена кумулятивная сварка, имеющая целью получить двухслойный материал, например, листы, состоящие из двух слоев различных металлов, — обычной и нержавеющей стали, алюминия и меди, серебра и бронзы. Чтобы обеспечить сварку двух листов различных металлов, один из этих листов кладут горизонтально на прочное плоское основание. Второй лист подвешивают над ним с небольшим наклоном и поверх этого второго листа помещают небольшой слой мощного взрывчатого вещества. При взрыве такого заряда верхний лист бросается с большой скоростью на нижний и соударяется с ним под небольшим углом. Ввиду того что скорость соударения очень велика (до тысячи метров в секунду), при взаимодействии двух слоев металлов возникают давления, во много раз превосходящие предел текучести.

В результате этого тонкие поверхностные слои соударяющихся материалов превращаются в тонкую кумулятивную струю и выбрасываются по направлению биссектрисы угла, образуемого соударяющимися слоями. В результате различные дефекты и загрязнения, находящиеся на поверхности свариваемых материалов, удаляются и слои различного состава сжимаются весьма высокими давлениями по вновь возникающей, совершенно чистой и свободной от дефектов поверхности. Опыт показывает, что таким путем могут быть соединены быстро и надежно такие вещества, которые не поддаются другим способам сварки или спайки (рис. 20).

При сварке взрывом кумулятивная струя уносит поверхностный слой свариваемого материала. Толщина этого слоя невелика и может регулироваться подбором угла φ , под которым соударяются свариваемые листы материала. Если происходит сварка одинаковых по плотности материалов, то толщина уносимого слоя составляет следующую долю d от полной толщины свариваемых листов в зависимости от угла φ :

φ	5°	10°	15°	20°	25°	30°
d , %	0,048%	0,191%	0,423%	0,760%	1,185%	1,704%

Таким образом, в кумулятивную струю уходит очень небольшая доля материала, но этого практически вполне достаточно для освобождения свариваемых поверхностей от дефектов и загрязнений.

Другим примером эффективного применения кумуляции можно считать детонирующий шнур нового типа, созданный в Швеции. Основная его особенность состоит в том, что этот

шнур представляет собой полую пластмассовую трубку, внутренние стенки которой покрыты тонким слоем высокочувствительного взрывчатого вещества. Обычно такая незначительная масса взрывчатого вещества недостаточна, чтобы передавать устойчивую волну детонации. Однако когда детонирует взрывчатое вещество на внутренней цилиндрической поверхности, то возникает эффект кумуляции и возникает из продуктов взрыва высокотемпературная кумулятивная струя, которая инициирует взрывчатое вещество и передает дальнее волну детонации.

При этом выделяемая общая энергия взрыва так невелика, что стенки трубы не разрушаются и разрушающее действие не передается в окружающую среду. В этом отношении трубчатый детонирующий шнур существенно отличается от обычных шнурков, представляющих, как известно, удлиненные заряды, способные при своей детонации производить вокруг себя существенные разрушения, помимо основной своей задачи — передать детонационный импульс в заданную точку.

Действие взрывных газов

Расширяющиеся взрывные газы могут наносить очень сильные удары по преградам, мешающим их движению. Обычно действие взрывных газов оказывается чрезвычайно кратковременным. Давление, которое они производят на встречаемые преграды, быстро изменяется. Поэтому измерить и детально учесть это давление затруднительно, да и не очень нужно для практики. Гораздо существеннее как с практической, так и с теоретической стороны является определение того общего действия, которое производят взрывные газы на ту или иную преграду.

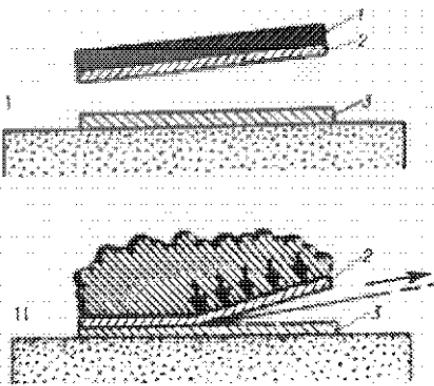


Рис. 26. Схема кумулятивной взрывной сварки двух материалов:

1 — до взрыва; II — после взрыва; III — заряд взрывчатого вещества; 2 — один из свариваемых материалов; 3 — второй из свариваемых материалов.

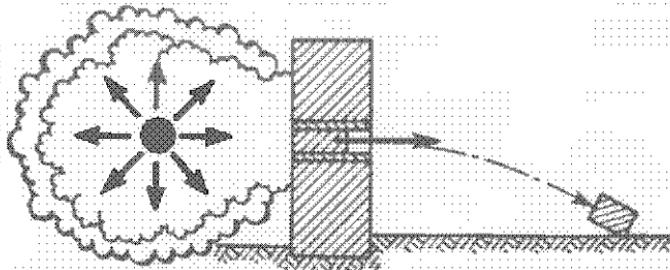


Рис. 21. Схема прибора для определения удельного импульса взрывных газов

Это общее действие можно измерить разными способами. Рассмотрим в качестве примера простейший способ.

На пути взрывных газов перпендикулярно к направлению их движения устанавливают достаточно прочную броневую или железобетонную плиту, способную выдержать без разрушения действия взрыва. В плите делается цилиндрическое отверстие с гладкими стенками, в которое вставляется легко перемещающийся цилиндр из металла (рис. 21).

При взрыве цилиндр воспринимает своим торцом действие взрывных газов. Под влиянием давления газов он получает определенную скорость и выбрасывается из отверстия.

Можно применить различные способы измерения скорости движения цилиндра. Например, определим расстояние x , которое он пролетает, прежде чем упадет на землю. Если цилиндр летит первоначально в горизонтальном направлении и падает с высоты y , то его скорость v_0 может быть определена на основе простейших законов механики. Как известно, время падения с высоты y равно

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}},$$

где g — ускорение свободного падения тела, равное приблизительно 10 м/с^2 . При таких условиях время падения с высоты в 1 м равно 0,45 с.

Если за время t цилиндр пролетит в горизонтальном направлении расстояние x , то его начальная скорость будет равна

$$v_0 = \frac{x}{t}.$$

или

$$v_u = x \sqrt{\frac{g}{2y}}$$

Скорость движения цилиндрика зависит не только от действия взрыва, но и от массы цилиндрика m_u . Количество движения, получаемого цилиндриком, при взрыве равно $m_u v_u$.

Это количество движения равно импульсу I_u , произведенному взрывными газами на торец цилиндрика.

Импульс, вызванный взрывом заряда, находящегося непосредственно на поверхности преграды, зависит от массы заряда и его удельной энергии U_1 . На основании экспериментов и теории можно установить, что для взрывчатых веществ средней мощности, таких, например, как тротил, импульс, производимый взрывом на преграду, соприкасающуюся с зарядом, равен

$$I_u = 100 q,$$

где I_u выражено в килограммосекундах, а q — в килограммах. Импульс пропорционален массе и скорости взрывных газов. Скорость взрывных газов, согласно гидродинамической теории взрыва, пропорциональна квадратному корню из удельной энергии заряда взрывчатого вещества U_1 .

Поэтому можно написать

$$I_u = 100 q \sqrt{\frac{U_1}{U_1}}$$

где U_1 — удельная энергия тротила, равная примерно 400 000 кгс·м/кг.

Если заряд расположен на небольшом расстоянии от поверхности, воспринимающей действие взрывных газов, то газы распространяются по всей преграде. Можно рассмотреть, как эти газы будут действовать на цилиндр, вложенный в отверстие преграды. На торец цилиндрика действует импульс

$$I_u = m_u v_u.$$

Очевидно, что величина I_u зависит в таких условиях от площади S_u торца цилиндрика. Чтобы избавиться от этой величины, которая меняется от случая к случаю, ее следует отнести к единице поверхности. С этой целью необходимо разделить I_u на S_u . Получим так называемый удельный импульс взрывных

газов (кгс·с/м²):

$$I_1 = \frac{I_0}{S_0} = \frac{m_{\text{вз}} v_{\text{вз}}}{S_0} = \frac{m_{\text{вз}}}{S_0} \sqrt{\frac{q}{2y}},$$

Удельный импульс взрывных газов тем больше, чем больше масса заряда, чем больше скорость разлета взрывных газов, и тем меньше, чем больше расстояние R от места взрыва до поверхности, воспринимающей импульс. При увеличении расстояния площадь, воспринимающая импульс, увеличивается пропорционально квадрату расстояния R . Очевидно, что удельный импульс тем меньше, чем больше указанная площадь. Следовательно, удельный импульс должен быть обратно пропорционален квадрату расстояния. В этом отношении удельный импульс имеет много общего с различными другими физическими величинами, изменяющимися также обратно пропорционально квадрату расстояния (освещенность, сила тяжести, напряженность электрического и магнитного полей и т.д.).

Согласно сказанному, можно написать

$$I_1 = A_1 \frac{q}{R^2}, \text{ кгс·с/м}^2,$$

где A_1 — постоянная, зависящая от удельной энергии взрывчатого вещества и принятых единиц измерения; q — масса заряда в килограммах; R — расстояние в метрах.

При этих условиях для взрывчатых веществ средней мощности, таких, например, как тротил, постоянная A_1 оказывается равной 25 с. Следовательно,

$$I_1 = 25 \frac{q}{R^2}.$$

Если взрывчатое вещество имеет удельную энергию, существенно отличную от удельной энергии тротила ($U_1 = 400\,000$ кгс·м/кг), то следует считать, что

$$A_1 = 25 \sqrt{\frac{U_1}{U_1}},$$

Такое значение величины A_1 имеет в том случае, если форма заряда близка к шару и взрывные газы разлетаются во все стороны равномерно, т.е. практического направленного действия взрыва не заметно.

Если же такое направленное действие есть, то в области газовых струй величина A_1 может превзойти приведенную величину

в 2–4 раза. Наоборот, в тех местах, где газовые струи отсутствуют, величина A_1 может существенно снижаться, особенно в защищенных зонах вблизи углов заряда.

Удельный импульс рассчитывается приведенным способом для случаев, когда взрывные газы действуют на поверхность перпендикулярно к направлению движения их. Если это направление отклоняется от перпендикулярного на угол α , то удельный импульс следует рассчитывать по следующей формуле:

$$I_1 = A_1 \frac{q}{R^2} \cos \alpha.$$

Если взрывные газы встречают на своем пути не плоскую преграду, а хорошо обтекаемое тело, то общий импульс, действующий на такое тело, снижается по сравнению с расчетной величиной в 2–4 раза (в зависимости от формы тела).

Знание удельного импульса имеет большое значение для решения многих практических задач. Для пояснения рассмотрим следующий пример.

Пусть на пути взрывных газов при взрыве заряда массой q на расстоянии R от места взрыва стоит прямоугольное тело высотой u и размерами основания x (по направлению действия взрыва) и z перпендикулярно к направлению действия взрыва. Вес тела равен G . Требуется определить, при каком значении R взрыв огрохнет тело.

Удельный импульс действует в рассматриваемом случае на площадь, равную uz . Общий импульс, получаемый телом, равен

$$I = m_1 v_1.$$

Скорость v_1 , получаемая телом, может быть найдена путем деления этого импульса на массу тела. Масса тела m_1 , равна его весу, деленному на ускорение свободного падения тела:

$$m_1 = \frac{G}{g}.$$

Таким образом,

$$v_1 = \frac{I}{m_1} = \frac{I}{G/g} = \frac{G}{I}.$$

Энергия движения, получаемая телом при взрыве заряда, как известно, равна

$$E_v = \frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{G v_1^2}{2}.$$

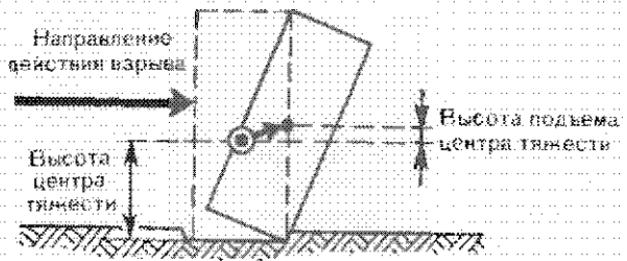


Рис. 22. Схема опрокидывания преграды взрывом

Можно также написать, что

$$E_v = \frac{1}{2} I_i^2 (yz)^2 \frac{g}{G}$$

Эта энергия будет затрачена на то, чтобы сдвинуть или опрокинуть тело.

При опрокидывании тело будет вращаться вокруг оси, совпадающей с ребром тела, идущим вдоль оси у тыльной стороны (по отношению к месту взрыва). При вращении центр тяжести тела будет подниматься (рис. 22).

Наибольшая высота подъема центра тяжести — Δy ; она может быть определена исходя из простых геометрических соотношений:

$$\Delta y = \frac{1}{2} \left(\sqrt{y^2 + x^2} - y \right)$$

Работа, необходимая для подъема центра тяжести на такую высоту, равна

$$E_G = \frac{G}{2} \left(\sqrt{y^2 + x^2} - y \right)$$

При таком расстоянии от места взрыва, на котором начинается опрокидывание, энергия, полученная телом от взрыва, равна энергии, необходимой для опрокидывания. Поэтому

$$E_v = E_G$$

Заменяя в этом равенстве значения энергии в соответствии с расчетами, сделанными выше, получаем

$$\frac{1}{2} I_i^2 (yz)^2 \frac{g}{G} = \frac{G}{2} \left(\sqrt{y^2 + x^2} - y \right)$$

Отсюда находим необходимый удельный импульс взрывных газов

$$I_1 = \frac{G}{yz} \sqrt{\frac{\sqrt{y^2 + x^2} - y}{g}}.$$

Заменив удельный импульс его значением (по приведенной выше общей формуле), можно написать

$$A_1 \frac{q}{R^2} = \frac{G}{yz} \sqrt{\frac{\sqrt{y^2 + x^2} - y}{g}}.$$

Отсюда можно найти расстояние R , на котором произойдет опрокидывание действием взрыва рассматриваемого тела. Получаем

$$R = \sqrt{A_1 yz} \sqrt{\frac{g}{\sqrt{y^2 + x^2} - y}} \sqrt{\frac{q}{G}}.$$

Характерной особенностью этой формулы является то, что в ней непосредственно проявляется простейший закон подобия, состоящий в том, что все соотношения сохраняются, если отношение q/G остается постоянным.

Другими словами, действие взрывных газов одного и того же взрывчатого вещества в определенной обстановке приводит к одинаковым результатам, если масса тел, воспринимающих это действие, находится в постоянном отношении к массе заряда.

Полученную формулу можно переписать так:

$$\frac{R}{y} = \sqrt{A_1} \sqrt{\frac{z}{y}} \sqrt{\frac{g}{\sqrt{x^2 + y^2} - x}} \sqrt{\frac{q}{G}}.$$

Из этой формулы видно, что, несмотря на сохранение условий геометрического подобия (когда R/y , z/y и $q/G = \text{const}$), равенство все же не соблюдается при всех значениях величины y . Наоборот, при увеличении y необходимо увеличивать q/G или z/y , чтобы сохранить постоянство R/y . Это значит, что даже такой простой результат действия взрыва, как опрокидывание предметов, происходит неодинаково при различных масштабах. Чем больше размеры зоны действия взрыва, тем ему труднее производить опрокидывание. Это видно из того, что при увеличении x и y отношение R/y уменьшается даже при постоянстве z/y . Поэтому изучение действия взрыва на малых моделях

далеко не всегда может дать результаты, соответствующие тому, что происходит при взрывах большого масштаба.

Воздушные волны наносят удар

Каким бы мощным не был взрыв в той или иной среде (воздух, вода, горная порода и т.п.), взрывные газы в целом не могут распространяться от места взрыва дальше определенной границы. В атмосферном воздухе нормальной плотности взрывные газы проходят путь, в среднем только в 12 раз превышающий радиус заряда. Отдельные газовые струи прорываются в 3–4 раза дальше, но и их путь сильно ограничен. Между тем разрушающее действие взрыва, а тем более сильный звук взрыва передаются на большее расстояние. Еще дальше передается повышение давления воздуха и так плавно, что его не слышит ухо человека, но отлично воспринимают простейшие приборы. Известно, например, что при взрыве огромного метеорита над районом Подкаменной Тунгуски в 1908 году волна повышенного давления воздуха трижды обогнула земной шар.

При этом повышение давления было довольно значительным – до 1 кгс/м².

Невольно возникает вопрос, в чем же состоит механизм, передающий энергию взрыва на громадные расстояния, превосходящие иногда длину окружности нашей планеты?

Но сначала надо остановиться на понятии воздушных ударных волн.

Действие взрывных газов в атмосфере ограничено тем, что сопротивление воздуха тормозит расширяющиеся газы, а в случае направленных газовых струй, кроме того, заставляет газовые струи расширяться и в конце концов сливаться друг с другом. Таким образом, на некотором расстоянии от заряда облако расширяющихся взрывных газов приобретает в целом гравийную шарообразную форму, хотя в деталях остаются отступления от этой формы за счет того, что расширяющиеся газы начинают вихреобразно смешиваться с окружающим воздухом (турбулентное перемешивание).

При этом наблюдается интересное и важное явление. Если взрывные газы содержат в себе достаточное количество таких веществ, которые не окислились (т.е. не соединились с кислородом) в процессе детонации, то перемешивание с воздухом вызывает интенсивное догорание взрывных газов. Появляется яркое пламя и энергия взрывных газов возрастает. Это явление

особенно характерно для взрыва тротиловых зарядов в воздухе. Оно дает увеличение энергии взрыва до 10—20%.

Поэтому удельная энергия тротила при взрыве в атмосфере соответственно больше энергии, выделяемой тротилом при взрыве в грунте. Однако энергия, получаемая дополнительно, не успевает передаться передней части ударной волны и идет главным образом на дополнительное нагревание взрывных газов. В некоторых случаях при взрыве в воде возможны также и сложные химические реакции.

Чтобы охарактеризовать зону, где действуют взрывные газы и происходит их направленное расширение, нужна условная мера длины, позволяющая свести к единой системе взрывы любого масштаба.

Допустим, что взрывчатое вещество представлено в виде шара. Радиус этого шара для тротила и многих других взрывчатых веществ средней мощности можно приближенно принять

$$R_0 = 0.05 \sqrt[3]{q},$$

где R_0 выражено в метрах, а q — в килограммах.

Величина R_0 — радиус заряда, приведенного к сферической форме, является очень распространенной мерой длины при описании действий взрыва в самых разнообразных средах. Удобство применения этой формулы состоит в возможности свести к единой картине взрывы зарядов всех размеров.

При расширении взрывных газов они встречают и оттесняют воздух, окружающий заряд. Если воздух имеет давление, близкое к нормальному, т.е. если не рассматриваются взрывы, происходящие на больших высотах, где воздух менее плотен, то можно считать, что плотность воздуха примерно в 1200—1500 раз меньше плотности обычных взрывчатых веществ.

Поэтому масса воздуха, равная массе заряда, должна содержаться в объеме, равном примерно 1200—1500 объемам заряда, или в шаре, имеющем радиус, равный

$$R_K = \left(\sqrt[3]{1200} + \sqrt[3]{1500} \right) R_0,$$

или

$$R_K = (11 \div 12) R_0.$$

Этот радиус имеет существенное значение при рассмотрении действий взрыва в воздухе. Дело в том, что, пройдя расстояние, равное R_K , масса взрывных газов вытесняет во все стороны равную себе массу воздуха. Этого оказывается достаточно, чтобы затормозить расширение взрывных газов и расстроить их

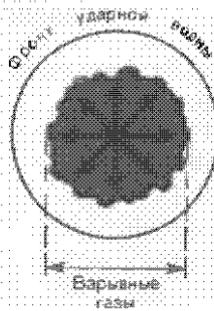


Рис. 23. Схема образованиями воздушной ударной волны при взрыве заряда ВВ в воздухе

Рис. 24. Схема распространения волны сжатия в пружине

направленные струи. Именно на расстоянии, близком к R_c , взрывные газы формируют сферическое облако, дальнейшее расширение которого протекает медленно.

Все описанные ранее действия взрывных газов проявляются в полной мере только на расстояниях R_c , не превосходящих R_c , т.е. $(11 \div 12) R_0$.

В силу закона механики "действие равно противодействию" взрывные газы при торможении воздухом сжимают этот воздух и сообщают ему некоторую скорость по направлению радиусов, идущих от центра взрыва. Масса взрывных газов, расширяясь, вытесняет окружающий ее воздух и образует вокруг себя зону сжатого, уплотненного и разогретого воздуха. Эта зона действует на окружающий, еще не позиционированный воздух и сжимает его. Таким способом сжатие быстро передается все дальше и дальше от места взрыва (рис. 23).

Чтобы понять это явление, можно рассмотреть вместо невидимых молекул воздуха обычную металлическую витую пружину, подвешенную горизонтально на достаточно длинных нитях. Если с одного конца ударить по этой пружине, то она сожмется сначала в пределах сравнительно небольшого участка, а потом это сжатие станет быстро, но все же заметно распространяться по пружине, пока не достигнет другого конца. Здесь можно наблюдать, как возникает и распространяется в телах вызываемая быстрым ударом волна сжатия (рис. 24).

Именно такая волна сжатия образуется и в воздухе при взрыве. Разница состоит только в том, что в отличие от опыта с пружиной волна сжатия в воздухе распространяется во все стороны от места взрыва. Впрочем и при взрыве можно получить движение волны только в одном направлении. Это наблюдается тогда, когда взрыв происходит в штолне, шахте, туннеле, трубе, т.е.

тогда, когда волны взрыва передаются в ограниченном столбе воздуха.

При внимательном наблюдении за волной, распространяющейся вдоль пружины, можно заметить, что вслед за волной сжатия следует волна разрежения.

Теория и опыт показывают, что в воздухе вслед за волной сжатия также следует волна разрежения. В волне сжатия давление, плотность и температура воздуха превышают эти величины для воздуха, еще не захваченного волной. В волне разрежения, наоборот, давление, плотность и температура воздуха ниже своих значений, чем в невозмущенной атмосфере.

Совокупность волн сжатия и разрежения передает действие взрыва через воздух на значительные расстояния, существенно превосходящие величину $A^{\frac{1}{2}}$.

Если взрыв очень сильный, то воздушные волны могут охватить весь земной шар, что наблюдалось при взрыве тунгусского метеорита в 1908 г., при взрыве вулкана Кракатау в 1883 г., а также при ядерных взрывах.

Во всех таких случаях волна сжатия проявляется в виде плавного увеличения давления воздуха, регистрируемого самопищущими барометрами — барографами. Такие волны отмечаются на расстояниях, не превышающих нескольких сотен километров от места взрыва.

Волны сжатия распространяются в воздухе несколько быстрее, чем звук. При этом чем значительнее повышение давления, тем быстрее движется волна. Эта простая и естественная закономерность приводит к тому, что волна сжатия имеет в своей передней части наиболее высокое давление. Далее давление постепенно падает и зона сжатия переходит плавно в зону разрежения. Таким образом, на переднем фронте волны сжатия давление скачкообразно возрастает до некоторого максимального значения. Волны такого рода называются *ударными волнами*. Воздушные ударные волны являются основными носителями энергии, переданной окружающему воздуху взрывом взрывчатого вещества.

Давление на фронте ударной волны

Основной характеристикой воздушной ударной волны является избыточное давление воздуха непосредственно за фронтом ударной волны. Избыточное давление является скачком давления ΔP_f , который происходит практически мгновенно при подходе волны к месту регистрации давления.

Воздушные ударные волны несколько напоминают детонационные волны. Однако между ними есть принципиальное различие: детонационная волна освобождает энергию, скрытую во взрывчатом веществе, и, так сказать, сама себя движет. Поэтому в каждом взрывчатом веществе скорость волны детонации вполне определенная и постоянная (если детонация осуществляется полностью).

Ударная волна, наоборот, движется за счет энергии, полученной вначале от взрывных газов и постепенно теряет ее. Это происходит потому, что энергия, во-первых, расходуется на нагревание воздуха, через который она проходит, и, во-вторых, потому, что объем воздуха, захвачиваемого волной, все время растет и в результате уменьшается количество энергии в единице объема. Поэтому по мере ее удаления от места возникновения давление на фронте ударной волны непрерывно падает. Падение давления ударной волны в зависимости от расстояния представляет собой весьма сложный процесс, который нельзя полностью изобразить при помощи простых формул.

Однако в последнее время этот процесс подробно рассчитан при помощи электронных счетных машин как в СССР, так и в США. Кроме того, имеются обширные опытные данные.

Приводимый далее расчет позволяет в общем виде решить задачу, которая еще недавно не решалась вообще, а сейчас для детального анализа требует более сложных расчетов, выполнимых с помощью электронно-счетных машин¹.

Основной особенностью ударных волн взрыва, как это было впервые установлено в СССР М.А. Садовским и П.И. Седовым и в Англии Тейлором, является то, что избыточное давление на фронте волны подчиняется закону подобия. Это значит, что эта величина не зависит от абсолютных размеров и массы заряда, а полностью определяется, если известны: отношение расстояния от места взрыва R к радиусу заряда R_0 , удельная энергия взрыва U_1 для данного взрывчатого вещества и давление окружающего воздуха P_0 .

Основой теории расчета избыточного давления является допущение, что отношение дополнительной энергии, имеющейся в воздухе вследствие сжатия его избыточным давлением, к перво-

¹ Прочитав несколько последующих страниц, читатель становится сознательным хозяином теоретических предпосылок учения об ударных волнах, даже не изучив сложные вопросы газодинамики и высшей математики.

чальной энергии воздуха находится в зависимости от отношения энергии, содержащейся до взрыва в объеме, который в данный момент захвачен ударной волной.

Энергия, полученная единицей объема воздуха от избыточного давления ΔP_{Φ} ударной волны, пропорциональна давлению ΔP_{Φ} . Энергия же, содержащаяся первоначально в единице объема воздуха, пропорциональна давлению невозмущенного воздуха P_0 .

Общая энергия, выделенная при взрыве, равна qU_1 .

Общая энергия, содержащаяся в воздухе, захваченном ударной волной, распространившейся на расстояние R от места взрыва сосредоточенного заряда (свободно расположенного в воздухе), пропорциональна

$$\frac{4\pi}{3} R^3 P_0$$

Следовательно, можно написать, что

$$\frac{\Delta P_{\Phi}}{P_0} = f\left(\frac{qU_1}{\frac{4\pi}{3} R^3 P_0}\right)$$

Символ $f(\dots)$ означает, что в этой части формулы стоит какая-то величина, зависящая только от отношения дроби, записанной в скобках, т.е. является функцией этого отношения.

Путем подбора такого выражения, которое удовлетворяло бы опытным наблюдениям и расчетам, проведенным с помощью электронно-счетных машин, можно установить, что

$$f\left(\frac{qU_1}{\frac{4\pi}{3} R^3 P_0}\right) = a_1 \frac{qU_1}{R^3 P_0} + a_2 \left(\frac{qU_1}{R^3 P_0}\right)^{\frac{2}{3}} + a_3 \left(\frac{qU_1}{R^3 P_0}\right)^{\frac{4}{3}}$$

где a_1 , a_2 , a_3 — постоянные величины, в которые введен множитель $4\pi/3$ и которые могут быть выражены определенными числами для всех взрывчатых веществ.

На основании двух последних формул можно написать

$$\frac{\Delta P_{\Phi}}{P_0} = a_1 \frac{qU_1}{R^3 P_0} + a_2 \left(\frac{qU_1}{R^3 P_0}\right)^{\frac{2}{3}} + a_3 \left(\frac{qU_1}{R^3 P_0}\right)^{\frac{4}{3}}$$

Произведя сокращения, можем написать

$$\Delta P_{\Phi} = a_1 U_1 \frac{q}{R^3} + a_2 U_1^{\frac{2}{3}} P_0^{\frac{1}{3}} \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R^2} + a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}} \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R}.$$

Можно установить следующее: если q выражено в килограммах, R — в метрах и ΔP_{Φ} — в килограммах на квадратный сантиметр, то для взрывчатых веществ средней мощности на основе опытов и расчетов на электронных машинах:

$$a_1 U_1 = 7;$$

$$a_2 U_1^{\frac{2}{3}} P_0^{\frac{1}{3}} = 2,7;$$

$$a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}} = 0,84.$$

Помимо опытов и сложных расчетов значение величины $a_1 U_1$ может быть определено и путем простого рассуждения. Рассмотрим давление на фронте ударной волны в момент ее зарождения, когда расстояние R равно радиусу заряда. В этом случае

$$R = R_0 = \sqrt[3]{\frac{q}{\frac{4\pi}{3} \gamma_{\text{ВВ}}}},$$

где $\gamma_{\text{ВВ}}$ — плотность взрывчатого вещества, равная для тротила 1600 кг/м³. Если $q = 1$ кг, то

$$R = R_0 = 0,053 \text{ м.}$$

При таком небольшом значении R второй и третий члены в формуле для расчета ΔP_{Φ} оказываются очень небольшими по сравнению с первым. Поэтому можно принять, что вблизи заряда

$$\Delta P_{\Phi} = a_1 U_1 \frac{q}{R^3}.$$

Заменив R^3 его значением, которое было определено выше, получим

$$\Delta P_{\Phi} = a_1 U_1 \frac{4\pi}{3} \gamma_{\text{ВВ}}.$$

Среднее значение давления во взрывных газах, согласно кинетической теории газов, равное с некоторым приближением ΔP_{Φ} , можно выразить так:

$$\Delta P_{\Phi} = \frac{2}{3} U_1 \gamma_{\text{ВВ}}.$$

Приравнивая правые части двух последних равенств, после несложных преобразований получаем

$$a_1 U_1 = \frac{U_1}{2\pi}.$$

Если величина $a_1 U_1$ определяется, когда давление измеряется в килограммах на квадратный сантиметр, то ее следует разделить на 10 000 (число квадратных сантиметров в квадратном метре). Следовательно, можно написать

$$a_1 U_1 = \frac{U_1}{2\pi \cdot 10\,000} = \frac{U_1}{62\,800}.$$

Удельная энергия U_1 тротила равна, как известно, примерно 430 000 кгс·м/кг. Следовательно,

$$a_1 U_1 = \frac{430\,000}{62\,800} \approx 7.$$

Именно это значение и следует принять для всех последующих расчетов, как было указано выше.

К сожалению, величины $a_2 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}}$ и $a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}}$ не удается обосновать так просто, и их значение необходимо устанавливать на основе опытов или расчетов, проводимых на электронно-счетных машинах. Следует отметить, что при очень больших расстояниях от места взрыва, когда R в сотни раз больше радиуса заряда, величина избыточного давления на фронте волны ΔP_Φ практически определяется одним только третьим членом в приведенной выше формуле.

Для таких значений R можно написать

$$\Delta P_\Phi = a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}} \frac{\frac{1}{3}}{R}.$$

Это обстоятельство упрощает нахождение величины $a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}}$.

На основании всего сказанного можно написать (для тротила и других взрывчатых веществ средней мощности), что

$$\Delta P_\Phi = 7 \frac{q}{R^3} + 2,7 \frac{q}{R^2} + 0,94 \frac{q}{R}.$$

Эта формула известна под названием формулы М.А. Садовского, впервые установившего ее коэффициенты.

Если вспомнить, что в рассматриваемом случае радиус заряда, приведенного к сферической форме, равен

$$R_0 = 0,05 \sqrt{q} ,$$

то можно написать

$$\Delta P_{\Phi} = 56000 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 + 1080 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 + 16,8 \frac{R_0}{R} .$$

При необходимости определения ΔP_{Φ} для взрывчатого вещества, отличающегося удельной энергией от тротила, можно написать

$$\Delta P_{\Phi} = 56000 \frac{U_1}{U_{1,T}} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 + 1080 \left(\frac{U_1}{U_{1,T}} \right)^{\frac{2}{3}} \times \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 + \\ + 16,8 \left(\frac{U_1}{U_{1,T}} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{R_0}{R} ,$$

где U_1 — удельная энергия взрывчатого вещества, при взрыве которого определяется ΔP_{Φ} , и $U_{1,T}$ — удельная энергия тротила.

Можно также написать

$$\Delta P_{\Phi} = 7 \frac{U_1}{U_{1,T}} \frac{q}{R^3} + 2,7 \left(\frac{U_1}{U_{1,T}} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R^2} + 0,84 \left(\frac{U_1}{U_{1,T}} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R} .$$

Если взрыв происходит не в воздухе, а в каком-либо другом газе с иным давлением P_{01} , при нормальных условиях, то можно написать

$$\Delta P_{\Phi} = 7 \frac{U_1}{U_{1,T}} \frac{q}{R^3} + 2,7 \left(\frac{U_1}{U_{1,T}} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{P_{01}}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}} \times \\ \times \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R^2} + 0,84 \left(\frac{U_1}{U_{1,T}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P_{01}}{P_0} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R} .$$

Величина P_0 , для различных сред не всегда известна. Поэтому можно воспользоваться для замены этой величины известной в газовой динамике формулой для скорости звука

$$c_1 = \sqrt{k_1 \frac{P_{01}}{\rho_1}}$$

где ρ_1 — плотность соответствующей среды, а величина k_1 соответствует величине k в формуле Ландау и Станюковича, связывающей давление и объем.

Тогда

$$P_{01} = \frac{\rho_1}{k_1} c_1^2$$

При таких условиях

$$\Delta P_{\Phi} = 7 \frac{U_1}{U_{1T}} \frac{q}{R^3} + 2,7 \left(\frac{U_1}{U_{1T}} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\rho_1 c_1^2}{k_1 P_0} \right)^{\frac{1}{3}} \times$$

$$\times \frac{\frac{2}{3}}{\frac{q}{R^2}} + 0,84 \left(\frac{U_1}{U_{1T}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_1 c_1^2}{k_1 P_0} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R}$$

Эти формулы справедливы при взрыве заряда, окруженного со всех сторон воздухом. Если заряд взрывается на поверхности грунта, то волна распространяется не в полной сфере, а только в полусфере (рис. 25). В результате этого объем воздуха, захватываемого ударной волной, уменьшается вдвое. В этом случае получается увеличение избыточного давления ΔP_{Φ} , которое наблюдается при взрыве заряда массой вдвое большей. Поэтому для расчета ударной волны, возникающей при взрыве заряда, пекущего на земле (или находящегося вблизи земной поверхности), необходимо в формулы расчета ΔP_{Φ} подставить вместо величины q удвоенную величину, т.е. $2q$.

В результате этого формула Садовского изменится следующим образом:

$$\Delta P_{\Phi} = 14 \frac{q}{R^3} + 4,3 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R^2} + 1,1 \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R}$$

Описанный способ расчета избыточного давления на фронте ударной волны может быть применен не только тогда, когда заряд взрывается в воздухе или на поверхности земли, но и в других условиях.

Рассматривая такой важный для практики случай, как взрыв в штолне, шахте или туннеле, надо учитывать два варианта. Во-первых, штолня может продолжаться в обе стороны от

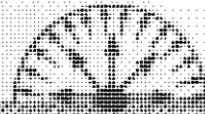


Рис. 25. Схема полусферической ударной волны при взрыве заряда ВВ на плоской поверхности массивной преграды.

на поверхности площадь фронта ударной волны уменьшается вдвое по сравнению с тем случаем, когда взрыв происходит в воздухе. Вследствие этого происходит усиление волны. Поэтому, чтобы учесть это, необходимо расчетную массу заряда увеличить во столько раз (по сравнению с действительной массой его), во сколько раз площадь фронта ударной волны в рассматриваемых условиях меньше площади поверхности соответствующего шара.

Если имеется двустороннее распространение ударной волны в штоле с площадью поперечного сечения S , то расчетное значение массы заряда будет равно

$$q = \frac{4\pi R^3}{2S} = 2\pi \frac{R^2}{S} q,$$

где R , как и в предыдущих расчетах, означает расстояние, пройденное ударной волной от центра взрыва, в метрах.

Подставляя это расчетное значение массы заряда вместо q в формулу Садовского, получим

$$\Delta P_{\Phi} = 7,2\pi \frac{R^2 q}{SR^3} + 2,7 \left(2\pi \frac{R^2}{S} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R^2} + 0,84 \times \\ \times \left(2\pi \frac{R}{S} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R}$$

или

$$\Delta P_{\Phi} = 44 \frac{q}{SR} + 9,2 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,46 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Если взрыв происходит в тупиковой штолне, что расчетное значение массы заряда удваивается и формула для расчета избыточного давления получает вид

$$\Delta P_{\Phi} = 88 \frac{q}{SR} + 14,6 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,81 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

места взрыва. Тогда воздушная ударная волна идет в обе стороны от места взрыва. Во-вторых, взрыв может произойти в тупике штолни. Тогда волна идет только в одну сторону и соответственно усиливается.

При взрыве на земной поверхности

ности площадь фронта ударной волны уменьшается вдвое по сравнению с тем случаем, когда взрыв происходит в воздухе. Вследствие этого происходит усиление волны. Поэтому, чтобы учесть это, необходимо расчетную массу заряда увеличить во столько раз (по сравнению с действительной массой его), во сколько раз площадь фронта ударной волны в рассматриваемых условиях меньше площади поверхности соответствующего шара.

Если имеется двустороннее распространение ударной волны в штоле с площадью поперечного сечения S , то расчетное значение массы заряда будет равно

$$q = \frac{4\pi R^3}{2S} = 2\pi \frac{R^2}{S} q,$$

где R , как и в предыдущих расчетах, означает расстояние, пройденное ударной волной от центра взрыва, в метрах.

Подставляя это расчетное значение массы заряда вместо q в формулу Садовского, получим

$$\Delta P_{\Phi} = 7,2\pi \frac{R^2 q}{SR^3} + 2,7 \left(2\pi \frac{R^2}{S} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R^2} + 0,84 \times \\ \times \left(2\pi \frac{R}{S} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R}$$

или

$$\Delta P_{\Phi} = 44 \frac{q}{SR} + 9,2 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,46 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Если взрыв происходит в тупиковой штолне, что расчетное значение массы заряда удваивается и формула для расчета избыточного давления получает вид

$$\Delta P_{\Phi} = 88 \frac{q}{SR} + 14,6 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,81 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Такой же расчет можно применить для определения избыточного давления на фронте воздушной волны достаточно длинного линейного заряда. В этом случае действие волны на расстоянии R от заряда длиной L при условии, что R меньше L , в основном распределяется по боковой поверхности цилиндра, имеющей площадь $2\pi RL$.

В соответствии с этим расчетную величину массы заряда необходимо определить по формуле

$$q \frac{4\pi R^2}{2\pi RL} = 2 \frac{R}{L} q.$$

Подставляя эту величину вместо q в формулу Садовского, получаем

$$\Delta P_{\Phi} = 14 \frac{q}{LR^2} + 4,3 \left(\frac{q}{LR^2} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,1 \left(\frac{q}{LR^2} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Если удлиненный заряд расположен на земной поверхности, то происходит помимо уже введенного перерасчета еще удвоение q . В результате этого получается

$$\Delta P_{\Phi} = 28 \frac{q}{LR^2} + 6,9 \left(\frac{q}{LR^2} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,3 \left(\frac{q}{LR^2} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Скорость ударной волны

Ударная воздушная волна распространяется со скоростью, которая превосходит скорость звука тем больше, чем значительнее избыточное давление на фронте ее. Расчеты, основанные на гидродинамической теории, дают формулу для определения ее скорости:

$$D_y = c \sqrt{1 + 0,83 \frac{\Delta P_{\Phi}}{P_0}},$$

где c — скорость звука в воздухе. Она зависит от температуры воздуха θ :

$$c = 20,1 \sqrt{273 + \theta},$$

где c — выражено в метрах в секунду, а θ — в градусах Цельсия.

Из приведенной для расчета D_y формулы следует, что при распространении ударной волны от заряда к тому или иному месту скорость фронта волны непрерывно уменьшается и посте-

ленно приближается к скорости звука. Это обусловлено тем, что давление на фронте волны непрерывно уменьшается по мере ее удаления от места взрыва, что затрудняет расчеты времени t , которое необходимо волне, чтобы пройти то или иное расстояние R .

Приближенный расчет этого времени с некоторым преувеличением результата (по сравнению с истинным значением t) можно получить, если определить избыточное давление на середине участка, проходимого ударной волной, рассчитать по этому избыточному давлению скорость фронта волны D_u и, деля путь волны на эту скорость, вычислить время t .

Отражение ударной волны

Воздушная ударная волна, встречая какую-либо преграду, отражается от нее. При этом давление увеличивается. Если от прочных, неподвижных преград отражаются сравнительно слабые волны, у которых ΔP_{Φ} меньше P_0 , то давление при отражении примерно удваивается. Если волны более сильные, то избыточное давление в отраженной волне возрастает более чем в 2 раза. Теоретический расчет дает следующую величину избыточного давления на фронте отраженной волны:

$$\Delta P_{\text{отр.}} = \Delta P_{\Phi} \left(2 + \frac{6}{P_0} \right) \left(1 + 7 \frac{\Delta P_{\Phi}}{P_0} \right)$$

Добавок к коэффициенту 2 тем больше, чем меньше отношение $\frac{P_0}{\Delta P_{\Phi}}$, т.е. чем сильнее ударная волна.

Если ΔP_{Φ} очень велико по сравнению с P_0 , то при отражении сильной воздушной волны от массивной, неподвижной преграды давление на ее фронте может возрастать до 8 раз.

Приведенный способ расчета $\Delta P_{\text{отр.}}$ можно применить на практике при условии, если направление движения волны до отражения отклоняется не более чем на 45° от перпендикуляра, построенного на отражающей поверхности. Если отклонение значительнее, то расчет $\Delta P_{\text{отр.}}$ становится сложным. Здесь нет возможности его рассмотреть; можно отметить лишь, что при углах между направлением волны и перпендикуляром

к отражающей поверхности, превосходящих 60° , давление в отраженной волне снижается и приближается к ΔP_Φ , если указанный угол увеличится до 90° .

Движение воздуха в ударной волне

В настоящее время наиболее распространенные способы измерения давления воздушных ударных волн основываются на использовании самопишущих осциллографов (катодных осциллографов с фотографической регистрацией).

Удобнее всего измерять давление в проходящей волне, когда она движется вдоль какой-либо плоскости, например вдоль поверхности земли. Приборы устанавливают так, чтобы их мембранны, воспринимающие давление, составляли часть поверхности, вдоль которой движется ударная волна. При таких условиях в месте измерения не происходит каких-либо возмущений воздушной ударной волны, поэтому давление можно удобно измерить как на фронте волны, так и на различных расстояниях за ним (рис. 26).

Для измерения используют обычно так называемый пьезоэффект. Это явление состоит в том, что при сжатии некоторых кристаллов (например, кварца) по определенному направлению на противоположных гранях этих кристаллов возникают электрические заряды разных знаков.

Если покрыть эти грани металлом и соединить их с электронной лампой, усиливающей ток, то на гранях кристалла в течение того или иного промежутка времени с помощью катодного осциллографа можно зарегистрировать изменения электрических зарядов. Получаемую на экране осциллографа картину изменения электрического напряжения во времени можно зафиксировать при помощи фотоаппарата. Кристаллы устанавливают под мембранны так, чтобы на него передавалось давление воздушной ударной волны. Таким способом можно получить на фотоснимке график зависимости давления воздушной ударной волны от времени.

Если ударная волна сравнительно слабая, то падение давления происходит практически по прямолинейному графику. Длившаяся некоторое время зона сжатия сменяется обычно более продолжительной зоной разрежения (рис. 27).

Общий удельный импульс от положительного избыточного давления сменяется импульсом подсоса, т.е. не отталкивается,

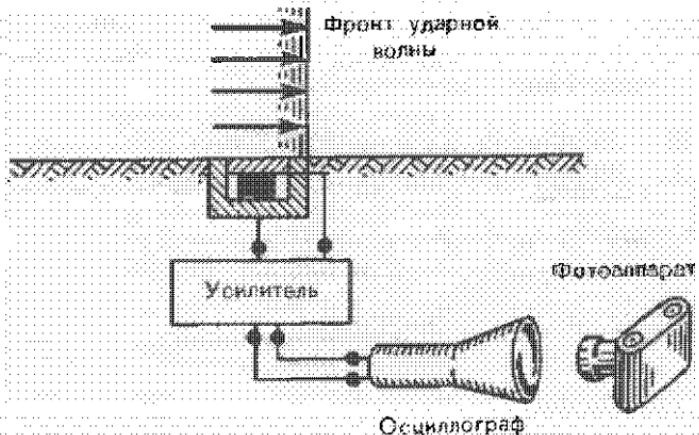


Рис. 26. Схема способа измерения давления в воздушной ударной волне

а притягивается к месту взрыва. Обычно импульс подсоса несколько больше, чем импульс сжатия.

Это наглядно видно, например, когда ударная волна взрыва выбивает стекла. Очень часто выбитые стекла падают не внутрь помещения, а вылетают наружу, навстречу ударной волне.

Воздух, через который проходит ударная волна, движется в зоне сжатия в ту же сторону, куда идет волна, а в зоне подсаса — в противоположную сторону.

Скорость движения воздуха наибольшая непосредственно за фронтом волны и равна

$$v_{\Phi} = \frac{\Delta P_{\Phi}}{\rho_0},$$

где ρ_0 — плотность невозмущенного воздуха. Эта формула имеет точно такой же вид и выводится подобно формуле для волны детонации. В ней давление должно быть выражено в килограммах на квадратный метр. Если же давление выражено в килограммах на квадратный сантиметр, как это делается обычно, то в формулу необходимо ввести множитель, равный 10 000. Кроме этого, нужно учесть, что плотность воздуха в нормальных условиях практически постоянна и может быть принята равной

$$\rho_0 = 0,125 \frac{\text{техн. ед. массы}}{\text{м}^3}.$$

Давление

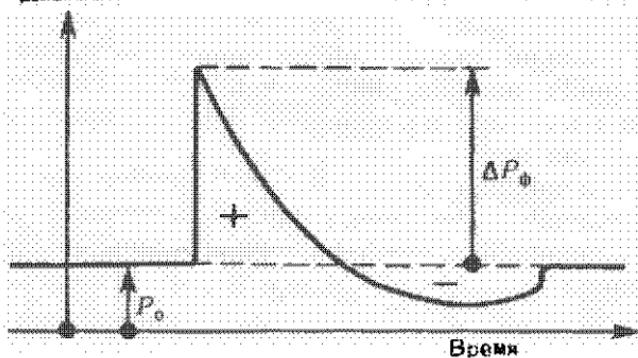


Рис. 27. График изменения давления при прохождении воздушной ударной волны

Тогда

$$u_\Phi = 80\,000 \frac{\Delta P_\Phi}{D}$$

Для приближенных расчетов можно принять, что

$$D \approx 400 \text{ м/с.}$$

Тогда

$$u_\Phi \approx 200 \Delta P_\Phi.$$

Это значит, что при избыточном давлении $\Delta P_\Phi = 0,3 \div 0,4 \text{ кгс/см}^2$ скорость воздуха за фронтом достигает 60-80 м/с, что равно скорости ветра при сильном урагане. Неудивительно, что при таком давлении и скорости воздуха за фронтом волны ударные волны очень мощных взрывов могут разрушать капитальные здания и тяжело травмировать людей. Однако при взрывах зарядов меньшей массы те же давления и скорости воздуха не причиняют столь сильных разрушений. Это объясняется тем, что при взрывах малых зарядов действие волны длится очень недолго.

Время действия и импульс ударной волны

Время действия положительного избыточного давления представляет собой важную практическую характеристику ударной волны, потому что именно это давление вызывает основные разрушения.

На основе опытов и расчетов на электронно-счетных машинах оказалось возможным установить зависимость времени t_+ от массы заряда q и расстояния R . Эта зависимость имеет вид

$$t_+ = 0,0015 \sqrt{R} \sqrt[6]{q} ,$$

где R выражено в метрах, а q — в килограммах, t_+ — в секундах.

С некоторым приближением можно написать

$$t_+ = \frac{R}{2c} \sqrt[6]{\frac{q}{R^3}} ,$$

где c — скорость звука. Величина $\frac{R}{c}$ приближенно равна времени, в течение которого ударная волна идет от места взрыва К месту, где определяется время действия ее избыточного давления. Величина $\sqrt[6]{\frac{q}{R^3}}$ равна единице, если $\frac{q}{R^3} = 1$. Если же эта величина даже существенно отличается от единицы, то корень высокой степени должен сравнительно мало отличаться от единицы. Например, при изменении $\frac{q}{R^3}$ в десять раз $\sqrt[6]{\frac{q}{R^3}}$ изменяется всего на 29%.

Отсюда следует, что приближенно время действия избыточного давления вдвое меньше времени движения волны от места взрыва до данной точки.

При сравнительно небольших значениях времени t_+ разрушения, производимые воздушной ударной волной, определяются *удельным импульсом избыточного давления* I_+ .

Эта величина может быть получена из графика зависимости давления от времени в воздушной ударной волне. Удельный импульс I_+ численно равен площади, которая ограничена кривой давления в зависимости от времени, и горизонтальной линией, соответствующей давлению в невозмущенном воздухе. Наблюдения и расчеты для взрывчатых веществ нормальной

мощности дают зависимость

$$I_1 = 40 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R},$$

где I_1 выражается в кгс·с/м², q — в килограммах и R — в метрах.

Удельный импульс пропорционален скорости разлета взрывных газов, образующих воздушную ударную волну. Эта скорость, как было рассмотрено выше, пропорциональна квадратному корню из удельной энергии взрыва U_1 . Поэтому можно написать, что

$$I_1 = 40 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R} \sqrt{\frac{U_1}{U_{17}}},$$

где U_1 — удельная энергия взрывчатого вещества, взрыв которого произвел удельный импульс I_1 ; U_{17} — удельная энергия тротила, равная, как указывалось выше, примерно 400 000 кгс·м/кг, или 4 000 000 кгс·м/техн. ед. массы.

Приведенные формулы для расчета I_1 относятся к взрыву заряда в воздухе. Если заряд взрывается в иных условиях, то необходимо ввести поправки, исходя из тех же соображений, какие были учтены при расчетах избыточного давления.

Например, если заряд расположен на поверхности земли, то расчетное значение массы заряда должно быть удвоено. Поэтому для взрывчатых веществ нормальной мощности

$$I_1 = 63 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R}.$$

Коэффициент в правой части этой формулы получен путем умножения $40 \cdot 2^{\frac{2}{3}} = 63$.

Если взрыв происходит в штолне без гуптика, то расчетная величина массы заряда будет

$$q \frac{4\pi R^2}{2s} = 2\pi \frac{R^2}{s} q,$$

поэтому

$$I_1 = 136 \left(\frac{q}{s} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt{R}.$$

Эта формула может вызвать недоумение. Ведь из нее следует, что удельный импульс положительного избыточного давления при удалении от места взрыва не только не уменьшается, но даже растет. Между тем опыт показывает, что в штолнях действие взрыва уменьшается при увеличении расстояния от места взрыва.

Это противоречие объясняется следующим образом. При движении воздушной ударной волны вдоль штолни все время увеличивается масса воздуха, передающая энергию взрыва, в то время как площадь, на которую может действовать эта масса, остается неизменной. Импульс зависит от массы, несущей энергию. Поэтому при увеличении расстояния удельный импульс взрыва безусловно должен увеличиваться. Однако при этом увеличивается также и время действия импульса.

Если расчетное значение массы заряда для взрыва в штолне, равное $2 \pi \frac{R^2}{S} q$, подставить в формулу для определения времени действия избыточного давления, то получится

$$t_+ = 0,02 \frac{R}{c} \sqrt{\frac{q}{RS}}.$$

Эта формула показывает, что время t_+ при взрыве в штолне заметно больше, чем при взрыве заряда в воздухе. Соответствующие расчеты показывают, что

$$\frac{t_+ (\text{в штолне})}{t_+ (\text{в свободном пространстве})} = \sqrt[3]{\frac{2\pi}{S}} \sqrt[3]{R}.$$

При взрыве в штолне площадью поперечного сечения 2×2 м ($S = 4 \text{ м}^2$) на расстоянии 10 м от места взрыва время действия избыточного давления в 2,3 раза больше, чем в свободном пространстве.

Если расстояние от места взрыва увеличивается до 100 м, то эта величина возрастет в 5 раз.

При очень длительном импульсе определяющее значение, как указывалось выше, имеет избыточное давление на фронте волны, которое при увеличении расстояния уменьшается также и при взрыве в штолне. Этим обусловлено то, что при взрывах в штолнях, шахтах, туннелях действие взрыва на очень больших расстояниях все же затухает.

Весьма опасны в штолнях и шахтах взрывы смеси воздуха с горючими газами (метан), выделяющимися нередко из горной

породы, а также взрывы смеси воздуха с угольной пылью. В таких случаях ударная волна первоначального взрыва может перерости в детонационную волну, способную идти неограниченно далеко по подземным коммуникациям и наносить огромный ущерб.

Приведенные здесь расчеты являются приближенными, в частности потому, что нами не учитывались потери энергии при движении волны вдоль неровных стенок подземной выработки. Если стены массивны и очень гладки (бетонированный туннель), то эти потери невелики и при приближенном расчете ими можно пренебречь. Однако в большинстве случаев потери становятся значительными, что приводит к уменьшению расчетной массы заряда. Если максимальная площадь сечения выработки (без крепи) S_0 , минимальная площадь поперечного сечения в том месте, где имеется крепь, равна S , а расстояние между стойками крепи R , то можно вывести, что эквивалентная расчетная масса заряда будет равна

$$q_e = \frac{S_0 - S}{S_0} R,$$

где $e \approx 2,72$ — постоянная величина — основание натуральных логарифмов. Расчетная масса заряда должна быть подставлена вместо q во все формулы при расчете параметров ударной волны при взрыве в подземной выработке.

При таком расчете получатся удельные импульсы, чаще всего возрастающие при удалении от места взрыва.

Возвратимся к расчету удельного импульса. Удельный импульс линейного заряда массы q и длиной L при условии, что L больше R , можно определить, используя расчетное значение массы заряда, приведенное выше и равное $2 \frac{R}{L} q$.

Подставляя эту величину в формулу для удельного импульса при взрыве заряда нормальной мощности, получаем

$$I_1 = \frac{63}{\sqrt{R}} \left(\frac{q}{L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Если линейный заряд находится на поверхности земли, расчетное значение массы заряда, согласно сказанному выше, удваивается. В этом случае

$$I_1 = \frac{100}{\sqrt{R}} \left(\frac{q}{L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Метание взрывом осколков оболочки заряда

Осколки взорвавшегося заряда, который заключен в металлическую оболочку или оболочку из другого достаточно прочного материала, получают значительные скорости и разлетаются на огромные расстояния.

Начальная скорость разлета осколков зависит от соотношения массы заряда и оболочки и от удельной энергии взрывчатого вещества. Для взрывчатых веществ средней мощности (тротил) можно на основании данных опыта и теоретического расчета написать такую формулу:

$$v_{\text{оск}} = 2500 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{G_{\text{об}}}{G_{\text{ВВ}}}}} - a \quad ,$$

где $v_{\text{оск}}$ — начальная скорость разлета осколков, выраженная в метрах в секунду; $G_{\text{об}}$ — масса оболочки, а $G_{\text{ВВ}}$ — масса заряда взрывчатого вещества. Величина a зависит от прочности материала оболочки. Для стали $a \approx 0,05$, для менее прочных материалов можно считать $a \approx 0,02$ или еще меньше.

Сопротивление воздуха уменьшает скорость разлета осколков. Наибольшая дальность разлета может быть принята равной

$$R_{\text{оск}} = 1,6 \frac{v_{\text{оск}}^2}{a} \quad ,$$

или

$$R_{\text{оск}} = 1,6 \frac{\gamma_{\text{оск}}}{\gamma_{\text{возд}}} \quad ,$$

где $\gamma_{\text{оск}}$ — плотность материала, а d — толщина оболочки заряда, которая при взрыве дробится и образует отдельные осколки; $\gamma_{\text{возд}}$ — плотность воздуха, равная γ поверхности моря в среднем 1,25 кг/м³ и уменьшающаяся примерно вдвое при подъеме на каждые 5 км. Если оболочка стальная или железная, то максимальная дальность разлета равна примерно

$$R_{\text{оск}} \approx 10000 d \quad .$$

Это значит, что при толщине оболочки в 1 см дальность разлета будет около 100 м.

Разлетающиеся осколки оболочки заряда, а также осколки предметов, разрушенных действием взрыва, опасны как для человека, так и для различных предметов, окружающих место взрыва. Особенно опасно то, что осколки, имеющие значительные скорости (более 1500 м/с), могут вызывать детонацию зарядов ВВ, если они проникают внутрь их. Детонацию может вызвать также кумулятивная струя.

Впрочем начальная скорость осколков очень быстро снижается по мере их удаления от места взрыва. Скорость на расстоянии R от места взрыва равна приближенно

$$v_R = v_0 e^{-\frac{\gamma_{\text{возд}} R}{\gamma_{\text{оск}} d}}$$

где e — основание натуральных логарифмов, а v_0 — начальная скорость разлета осколков.

Рассмотренные способы расчета действия взрыва в воздухе для удобства пользования ими сопоставлены ниже в виде краткой сводки.

Сводка формул при расчете действия взрыва в воздухе для взрывчатых веществ средней мощности (q — масса заряда ВВ, выраженная в килограммах; R — расстояние от места взрыва, выраженное в метрах).

I. Заряд расположен на преграде.

Общий импульс $I = 100q$, кгс·с.

II. Заряд на расстоянии $R \leq 12 R_0$ ($R_0 = 0,05 \sqrt[3]{q}$).

Удельный импульс взрывных газов заряда, близкого к шару (сосредоточенный заряд), равен

$$I_1 = 25 \frac{q}{R^2}.$$

III. Заряд на расстоянии $R \geq 12 R_0$.

Основные величины, характеризующие воздушную ударную волну:

1. Избыточное давление на фронте ударной волны при взрыве в воздухе, кгс/см².

а) взрыв сосредоточенного заряда в воздухе

$$\Delta P_{\Phi} = 7 \frac{q}{R^3} + 2,7 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 0,84 \frac{q^{1/3}}{R};$$

б) взрыв сосредоточенного заряда на поверхности земли

$$\Delta P_{\Phi} = 14 \frac{q}{R^3} + 4,3 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 1,06 \frac{q^{1/3}}{R};$$

в) взрыв сосредоточенного заряда в штолне неограниченной длины и площадью поперечного сечения $S, \text{ м}^2$

$$\Delta P_{\Phi} = 44 \frac{q}{SR} + 9,2 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,46 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{1}{3}} ;$$

г) взрыв сосредоточенного заряда в тупике штолни

$$\Delta P_{\Phi} = 88 \frac{q}{SR} + 14,6 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,81 \left(\frac{q}{SR} \right)^{\frac{1}{3}} ;$$

д) взрыв линейного заряда длиной L в воздухе ($L > R$)

$$\Delta P_{\Phi} = 14 \frac{q}{LR^2} + 4,3 \left(\frac{q}{LR^2} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,06 \left(\frac{q}{LR^2} \right)^{\frac{1}{3}} ;$$

е) взрыв линейного заряда на поверхности земли

$$\Delta P_{\Phi} = 28 \frac{q}{LR^2} + 6,9 \left(\frac{q}{LR^2} \right)^{\frac{2}{3}} + 1,34 \left(\frac{q}{LR^2} \right)^{\frac{1}{3}} ;$$

2. Удельный импульс избыточного давления ударной волны, $\text{kгс} \cdot \text{с/м}^2$:

а) взрыв сосредоточенного заряда в воздухе

$$I_1 = 40 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R} ;$$

б) взрыв сосредоточенного заряда на поверхности земли

$$I_1 = 63 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R} ;$$

в) взрыв сосредоточенного заряда в штолне неограниченной длины и площадью поперечного сечения $S, \text{ м}^2$

$$I_1 = 136 \left(\frac{q}{S} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt[3]{R} ;$$

г) взрыв сосредоточенного заряда в тупике штолни

$$I_1 = 216 \left(\frac{q}{S} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt[3]{R} ;$$

д) взрыв линейного заряда длиной L в воздухе ($L > R$)

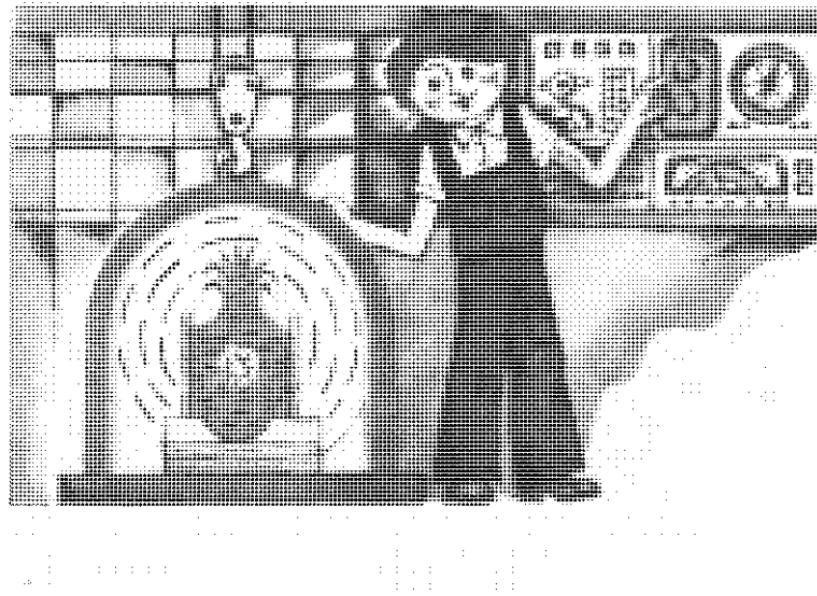
$$I_1 = 63 \frac{1}{\sqrt[3]{R}} \left(\frac{q}{L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

е) взрыв линейного заряда на поверхности земли

$$I_1 = 100 \frac{1}{\sqrt[3]{R}} \left(\frac{q}{L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

3. Скорость воздуха за фронтом ударной волны, м/с

$$u_\Phi \approx 200 \Delta P_\Phi$$

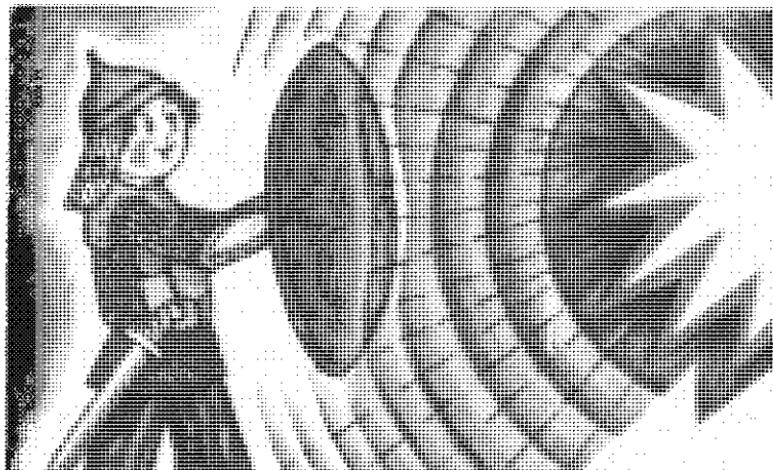


Взрыв в настоящее время приобретает все более существенное значение при штамповке и сварке металлов с помощью кумуляции. При таком применении взрыва значительная доля энергии взрыва неизбежно оказывается неиспользованной и создает в окружающем воздухе интенсивную ударную волну, которая может травмировать людей и вообще создает недопустимую обстановку в производственных помещениях. Чтобы избежать этой трудности, нередко приходится выносить взрывные работы в зоны, удаленные от других цехов, что, конечно, также является неудобным. Поэтому в ряде случаев делаются попытки различными способами снизить звуковой эффект при взрыве.

Одним из путей решения такой задачи является следующее. Установку с зарядом взрывчатого вещества, подготовленного к взрыву, накрывают сверху прочным стальным колпаком, обычно перемещаемым с помощью мостового крана или другого подъемного

ГАШЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН ВАКУУМОМ

механизма. Из-под этого колпака удаляют воздух с помощью обычного вентилятора, снижающего давление примерно на порядок величины. Теория и опыт показывают, что снижение давления среды в зоне взрыва и применение массивного колпака существенно снижают уходящую наружу звуковую волну. Таким путем на практике оказалось возможным сделать применение взрывной технологии вполне осуществимым в условиях современного производства.



Если вдоль подземной выработки (штолни, шахты) распространяется воздушная ударная волна, то ее действие может быть ослаблено преградой, поставленной на пути ее распространения. При этом осуществить достаточно прочную преграду затруднительно. Менее прочная преграда будет, однако, разрушена волной. Если материал разрушающей преграды выбран такой, чтобы при действии волны он разрушался на достаточно мелкие частицы (слабо сцепментированный, например, влажный песок), то эти частицы полетят после разрушения преграды в воздухе выработки на расстояние, равное приблизительно

$$L_K = r \frac{\gamma_{\text{пр}}}{\gamma_{\text{в}}},$$

где r — размер частиц материала преграды; $\gamma_{\text{пр}}$ — плотность материала преграды и $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воздуха. Отношение этих плотно-

ГАШЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН РАЗРУША- ЕМЫМИ ПРЕГРАДАМИ

стей практически имеет величину порядка 2000, поэтому

$$L_k \approx 2000 \text{ м.}$$

Дальше по выработке будет распространяться ослабленная воздушная ударная волна, параметры которой будут соответствовать взрыву заряда с тротиловым эквивалентом:

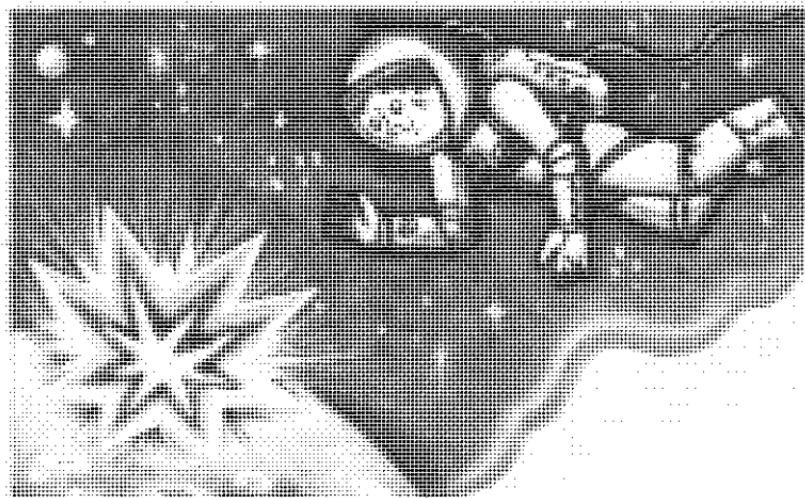
$$q_3 \approx q \frac{1}{1 + 4 \sqrt{\frac{Q}{q}} - \frac{b \gamma_{\text{пр}}}{3\sqrt{L}}}$$

где Q — площадь поперечного сечения выработки; q — тротиловый эквивалент взорванного заряда; L — расстояние от взорванного заряда до разрушающей преграды; b — толщина преграды.

Если в качестве примера принять $q = 100 \text{ кг}$, $Q = 10 \text{ м}^2$, $L = 10 \text{ м}$; $b = 0,5 \text{ м}$ и $\gamma_{\text{пр}} = 2000 \text{ кг/м}^3$, то

$$q_3 \approx q \frac{1}{300}$$

Это значит, что разрушающая преграда может быть эффективной.



Развитие космонавтики в последнее время привело к тому, что в ближайшие годы можно ожидать развития различных работ как в вакууме космического пространства, так и на некоторых небесных телах. В частности, можно предполагать, что взрывы окажутся необходимы при проведении работ по сварке и штамповке взрывом, при применении взрыва для дробления и разрушения горных пород и других целей. В связи с этим возникает вопрос и об интенсивности ударных волн, которые будут при этом возникать. Представление об этих волнах можно получить, рассматривая избыточные давления на фронте в различных условиях. Эти давления ударных волн взрыва на земле, в космосе и на небесных телах приведены в табл. 1. Из нее следует, что условия в космосе могут довольно сильно влиять на действие взрыва.

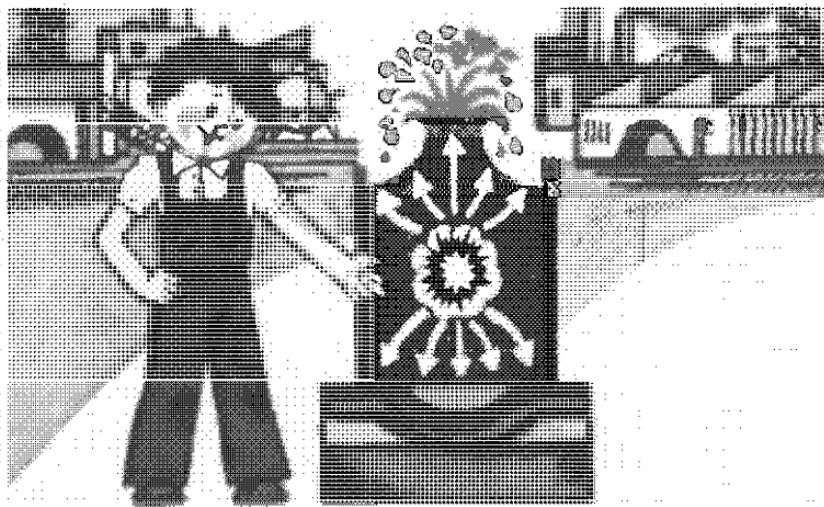
По поводу действия на Луне и в космосе, где практически никакого газа нет, надо заметить, что волна, вызванная взрывом, обусловлена только расширением взрывных газов в пустоту. В этом случае, строго говоря,

ИЗБЫТОЧНОЕ
ДАВЛЕНИЕ
УДАРНОЙ
ВОЛНЫ
В РАЗЛИЧНЫХ
УСЛОВИЯХ
В КОСМОСЕ

Таблица 1

Среднее значение в нейтронном излучении	Формула для расчета давления ΔP_Φ в кг/см ² (веса заданы в килограммах, радионуклиды в метрах)	Избыточное давление волны ΔP_Φ (кг/см ²) при различных значениях $\frac{g}{R^3}$, кг/м ³			
		1	0,1	0,01	0,001
Земля у поверхности	$\Delta P_\Phi = 7 \frac{g}{R^3} + 2,7 \left(\frac{g}{R^3} \right)^{1/3} + 0,84 \left(\frac{g}{R^3} \right)^{2/3}$	0,5	1,67	0,37	0,12
Кости скелета	$\Delta P_\Phi = 7 \frac{g}{R^3}$	7	0,7	0,07	0,007
Костячное излучение	$\Delta P_\Phi = 7 \frac{g}{R^3}$	7,25	0,78	0,11	0,011
Мясо у поверхности	$\Delta P_\Phi = 7 \frac{g}{R^3} + 0,021 \left(\frac{g}{R^3} \right)^{1/3} + 0,16 \left(\frac{g}{R^3} \right)^{2/3}$	0,0063	0,021	0,0021	0,00021
Вода у поверхности	$\Delta P_\Phi = 7 \frac{g}{R^3} + 7,36 \left(\frac{g}{R^3} \right)^{1/3} + 6,20 \left(\frac{g}{R^3} \right)^{2/3}$	20	4,57	1,75	0,70

нельзя говорить об ударной волне со скачком давления на фронте. Однако взрывные газы, как это следует из формулы для расчета давления ΔP_f на поверхности Луны (см. табл. 1), будут оказывать значительное воздействие на окружающие предметы даже на относительно больших расстояниях от центра взрыва. Например, при взрыве заряда массой 10 кг на расстоянии 10 м от центра взрыва давление взрывных газов будет около 0,1 кгс/см², что уже будет представлять опасность для космонавтов и космических аппаратов. Приводимые данные для взрыва в космическом вакууме на поверхности Луны следует считать ориентировочными.



Действие взрыва в воде

Взрыв в воде в последнее время стали использовать для штамповки изделий из металла. Но взрыв в воде имеет и совсем иное, гораздо более существенное значение. Действие взрыва на воду является очень ярким примером действия силы на любую несжимаемую среду. Движение воды после взрыва позволяет изучить физические основы, необходимые для понимания особенностей взрыва в грунтах и горных породах. Кроме того, взрывник может столкнуться со взрывными работами, проводимыми под водой в грунте, скале, почве, разрушении бетона, металла и других материалов.

При взрыве в воде, так же как и при взрыве в любой иной среде, происходит детонация заряда. Образовавшиеся взрывные газы первоначально имеют давление, во много раз превосходящее давление окружающей воды.

ВЗРЫВОМ ЗАМЕНЯЕТСЯ ШТАМП

Вследствие этого взрывные газы интенсивно оттесняют воду во все стороны от места взрыва и расширяются с большой скоростью. Это расширение похоже на начальные стадии расширения взрывных газов при взрыве в воздухе. Однако вода, окружающая место взрыва, оказывает значительно большее сопротивление газам, чем воздух. Это приводит к очень быстрому исчезновению направленного действия взрывных газов и торможению движения осколков оболочки, если заряд находится в оболочке. При взрыве в воде очень быстро образуется шарообразный газовый пузырь.

Вытесняемая из этого пузыря вода получает значительные скорости, которые направлены по радиусам, исходящим от центра взрыва. В воде передается высокое давление взрывных газов и под действием его вода немного сжимается. Область этого сжатия ограничивается скачком давления извне, т.е. фронтом ударной волны в воде.

Ударная волна в воде может рассматриваться исходя из тех же предпосылок, которые положены в основу изучения воздушных ударных волн. Можно считать, что вода представляет собой газ, чрезвычайно сильно сжатый молекулярными силами, т.е. с очень сильным притяжением молекул воды друг к другу. Это притяжение настолько уплотняет воду, как если бы она была сжата внешним давлением, примерно в 10 000 раз превосходящим нормальное давление атмосферного воздуха. Так как различные внешние нагрузки почти не могут изменить плотность воды, то обычно она считается несжимаемой. Но при взрыве некоторое сжатие ее все же возникает и это сопровождается появлением в воде весьма высоких давлений за фронтом водяной ударной волны.

Еще недавно расчет избыточного давления в водяной ударной волне считался очень сложным и недоступным. Однако в настоящее время оказалось возможным найти такие способы расчета, которые вполне доступны любому взрывнику, знакомому со средней математикой. Здесь мы и приводим этот расчет.

Обобщенная формула Садовского для различных сред, внутри которых действует давление P_{61} , отличное от нормального давления воздуха P_0 , была приведена на стр. 71. Как указано выше, можно считать, что для воды P_{61} в 10 000 раз больше, чем для воздуха. Поэтому для воды можно написать

$$\Delta P_{\Phi} = 7 \frac{U_{\Phi}}{U_{1T} R^3} + 58 \left(\frac{U_1}{U_{1T}} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R^2} + 391 \left(\frac{U_1}{U_{1T}} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R} .$$

Однако расчеты, производимые таким путем, сложны, в то время как на практике оказывается вполне достаточным применять и более простые способы, хотя они и не вполне точные при очень больших или очень малых давлениях, не имеющих практического значения.

Учитывая сказанное, на практике обычно применяют для расчета давления на фронте ударной волны в воде формулу американского ученого Коула

$$\Delta P_{\phi} = 533 \left(\frac{\rho^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{13}$$

Оба способа расчета дают совпадающие практически результаты при значениях ΔP_{ϕ} около 10—1000 кгс/см².

Ниже дано сопоставление значений ΔP_{ϕ} , вычисленных по обеим приведенным формулам для заряда тротила массой 1 кг.

Расстояние, м	0,53	1,06	2,12	4,24	8,48	16,96	38,9
ΔP_{ϕ} по сбобщенной							
формуле Садовского	995	428	200	96	43	23	12
ΔP_{ϕ} по формуле							
Коула	1095	502	229	106	48	22	11

Измерение давления в воде при взрыве происходит в принципе такими же способами, какие применяются для измерения давления при взрыве в воздухе. Отличие состоит только в том, что в воде, как показывает практика, давление измеряют прибором, расположенным в произвольном положении относительно направления распространения ударной волны.

Влияние свободной поверхности на действие взрыва в воде

При рассмотрении действия взрыва в воде чрезвычайно большое значение имеет свободная поверхность.

Когда фронт водяной ударной волны доходит до свободной поверхности, дальнейшее распространение волны скатия становится невозможным.

Вода, находящаяся под действием огромного давления за фронтом ударной волны, получает возможность свободно двигаться в сторону слабо сопротивляющегося воздуха. При

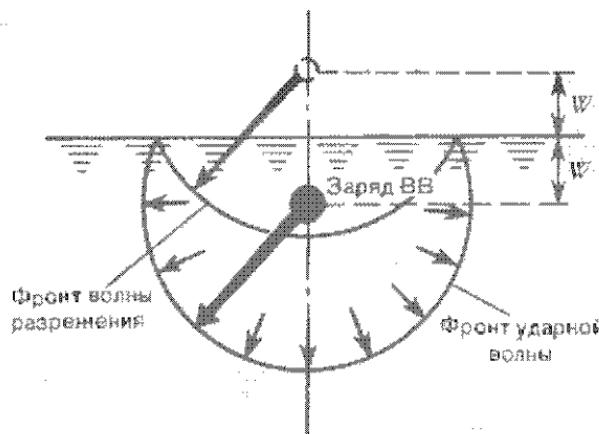


Рис. 28. Схема фронтов волн сжатия и разрежения в воде

в этом происходит следующее. Сначала наблюдается небольшой всплеск за счет быстрого расширения сильно сжатого поверхностного слоя воды. Далее начинается общий подъем всей массы воды, находящейся между ее поверхностью и газовым пузырем. В результате этого возникает мощный столб воды (султан), поднимающийся на значительную высоту над местом взрыва.

Энергия, необходимая для образования этого столба, передается воде в основном за счет расширения взрывных газов, находящихся в газовом пузыре. Энергия сжатия быстро переходит в энергию движения воды и избыточное давление в воде и в газовом пузыре весьма быстро исчезает.

В глубь воды от ее свободной поверхности движется фронт волны разрежения, за которым избыточное давление практически сразу исчезает.

Волна разрежения является волной, отраженной от поверхности воды. В отличие от условий отражения ударных волн от массивных несжимаемых преград, когда происходит повышение давления, при отражении от свободной поверхности избыточное давление исчезает вовсе.

Фронт волны разрежения представляет собой шаровую поверхность, центр которой находится в воздухе над поверхностью воды на высоте W . Эта высота равна глубине, на которой расположен центр взрыва, под поверхностью воды.

При таких условиях зона повышенного давления в воде имеет в вертикальном разрезе форму полумесяца. Она ограничена снизу фронтом волны сжатия, а сверху — фронтом волны разрежения. Оба фронта взаимно пересекаются на поверхности воды (рис. 28).

Действие взрыва в воде сильно зависит от глубины, на которую опущен заряд в воду. Это соответствует общим представлениям о действии взрыва при наличии забойки. В данном случае забойкой является слой воды, расположенный над зарядом.

Значительное влияние свободной поверхности на движение воды при взрыве может быть использовано для создания направленного действия взрыва в воде.

Пусть необходимо при помощи взрыва перебить сваю под водой. С этой целью к свае с одной стороны крепят соответствующий заряд. Со стороны, противоположной заряду, надо прикреплять сосуд с воздухом, например одну или несколько консервных банок, повернутых стверстинами вниз. При взрыве вода сжимает банки с воздухом и сообщает свае в зоне взрыва большую скорость, направленную в сторону воздушной полости (рис. 29).

Опыт показывает, что таким путем можно уменьшить необходимый для подрыва сваи заряд в 2–6 раз и в значительной мере снизить вредное действие водяной ударной волны.

Вместо пустых консервных банок можно применить также кусок сухого, не успевшего промокнуть, дерева. В порах такого дерева содержится много воздуха. Дерево намного сильнее сжимается, чем вода, и производит такое же действие, как банка с воздухом.

Распределение скоростей в воде при подводном взрыве

При действии взрыва в воде после прохождения центра ударной волны вода получает сначала движение по направлению радиусов, исходящих от центра взрыва. При этом скорости оказыва-

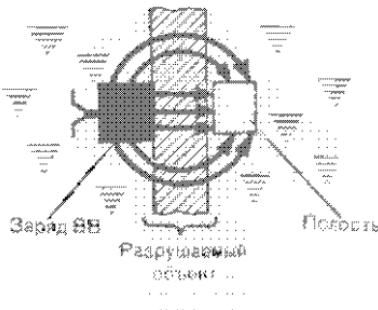


Рис. 29. Схема применения сосуда с воздухом для усиления направленного действия подводного взрыва

ваются обратно пропорциональными квадрату расстояния от центра взрыва.

Если фронт ударной волны уходит достаточно далеко от места взрыва, то можно считать, что вся энергия, переданная воде, распределяется между энергией движения воды, энергией, затраченной на сжатие воды и оставшейся во взрывных газах. Можно считать, что воде передана энергия, которая равна bqU_1 , (b — доля энергии, переданной на движение воды; q — масса заряда; U_1 — удельная энергия взрывчатого вещества).

Если вычислить общую энергию движения воды в рассмотренных условиях, то получится следующее:

$$bqU_1 = \frac{2\pi}{3} \rho_w R_0^3 v_0^2$$

где ρ_w — плотность воды; R_0 — радиус заряда, приведенного к форме шара; v_0 — скорость, какую имела бы вода в начальный момент движения на границе со взрывными газами.

Отсюда получаем

$$v_0 = \sqrt{\frac{3bqU_1}{2\pi\rho_w R_0^3}}$$

Величина b должна быть принята здесь равной 0,8.

На любом расстоянии R от места взрыва скорость будет

$$v_R = v_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{1/2}$$

После установления в воде такого движения через воду проходит волна разрежения. Эта волна создает дополнительные скорости в воде. Обусловлено это тем, что вода устремляется в сторону свободной поверхности в направлении к центру, из которого как бы исходит волна разрежения. Центр находится над поверхностью воды на высоте h , равной глубине, на которой расположен заряд под поверхностью воды.

Эти скорости подчиняются тем же самим законам, но только направлены к другому центру. При возникновении новых скоростей старые скорости сохраняются. В каждой точке обе скорости складываются по закону параллелограмма скоростей. Скорости, имеющиеся в какой-либо точке, откладываются в направлениях соответствующих радиусов в виде стрелок. Длина этих стрелок принимается пропорционально скоростям. На этих стрелках строится параллелограмм. В параллелограмме прово-

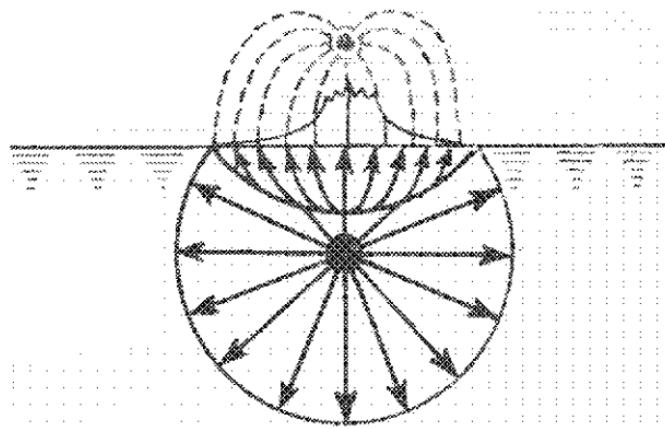


Рис. 30. Линии тока при подводном взрыве.

дится диагональ из точки, откуда отложены скорости. Построенная таким способом диагональ изображает величину и направление скорости в рассматриваемой точке.

Таким путем можно построить скорости движения воды в различных точках вокруг места взрыва. Далее можно провести кривые линии, идущие так, чтобы скорости движения воды были касательными к этим кривым. Построенные таким способом кривые линии показывают, куда движется вода после взрыва. Поэтому их можно назвать *линиями тока* (рис. 30).

На основании общих законов физики можно показать, что линии тока воды, возникающие при взрыве, имеют ту же самую форму, какую имеют силовые линии электрического поля.

Если в пространстве поместить два шарика, к которым прикреплены многочисленные легкие нити в виде сultанов, и зарядить один из шариков положительным, а другой отрицательным электрическим зарядом, то эти нити расположатся в пространстве так же, как линии тока в воде. На этом основана так называемая электротехническая аналогия между электрическим полем (пространством, где действуют электрические силы) и массой среды, приведенной в движение взрывом. Электротехническая аналогия широко применяется в настоящее время при изучении действия взрыва не только в воде, но и в других средах. При взрыве в воде и других достаточно плотных средах расширение взрывных газов ограничивается давлением окружающей среды и объемом попости, образующейся под

действием давления взрывных газов, уменьшается при возрастании глубины расположения заряда. Если в воде объем полости, получаемой на глубине 10 м, принять за единицу, то объем на глубинах 20, 30, 40 м составит соответственно 0,75, 0,60 и 0,51. Это приведет и к уменьшению объема сultана воды, выбрасываемого после взрыва вверх над поверхностью воды. Меньше станут также значения скоростей смещения воды.

Штамповка подводным взрывом

Практическое применение взрыва не ограничивается рыхлением грунтов и горных пород. Дальнейшее развитие теории взрыва дало возможность использовать это явление для штамповки металлических изделий.

Много времени уходит на изготовление сложных гидравлических прессов, массивных штампов и матриц из прочных стальных сплавов. На громоздкую технологию штамповки затрачиваются огромные материальные средства, мобилизуются большие производственные мощности.

Небольшой заряд дешевого взрывчатого вещества при искусном применении может заменить тысячетонные прессы и получить необходимую продукцию быстро, большой точности и сложной конфигурации.

Одним из способов взрывной штамповки является следующий.

Поверх матрицы, имеющей форму штампируемого изделия, укладывается лист металла. По краям этот лист тщательно зажимается кольцевым фланцем на мощных болтах. В матрице предусматриваются многочисленные отверстия для того, чтобы при штамповке обеспечить выход воздуху, заключенному между металлическим листом и ее поверхностью.

Сверху над металлическим листом помещается цилиндрический сосуд с водой. Диаметр этого сосуда берется несколько больший, чем диаметр матрицы. В воду помещают заряд взрывчатого вещества. Обычно этот заряд располагают посередине высоты слоя воды, т.е. на равных расстояниях от свободной поверхности воды и от поверхности листа металла (рис. 31).

При взрыве энергия, передаваемая воде, разделяется примерно на две равные части. Половина этой энергии затрачивается на выброс воды вверх, в воздух. Другая часть энергии идет на деформацию обрабатываемого металлического листа.

Если прогиб листа, получаемый при взрыве, недостаточен

для того, чтобы впрессовать заготовку в полной мере в матрицу, то производят один или несколько дополнительных взрывов до тех пор, пока изделие не будет полностью впрессовано в матрицу.

Приближенно можно считать, что половина всей энергии, выделяемой при взрыве и передаваемой воде, идет на штампованием. Эта энергия равна $\frac{1}{2} bU_1 q$.

Если при штамповании среднее смещение обрабатываемого металла равно h и общая сила, действующая на заготовку, равна F , то можно считать, что работа штампованием является произведением Fh .

На основе закона сохранения энергии работа штампованием равна затрачиваемой на штампованием энергии взрыва:

$$Fh = \frac{1}{2} bU_1 q.$$

Отсюда можно определить среднюю силу, производящую штампованием,

$$F = \frac{bU_1 q}{2h}.$$

Если, например, для штампованием применяется взрыв тротилового заряда массой $q = 10 \text{ кг}$ и средняя деформация штампируемой заготовки равна $h = 0,1 \text{ м}$, то сила, производящая штампованием, оказывается равной ($b = 0,8$; $U_1 = 400\,000 \text{ кгс}\cdot\text{м}/\text{кг}$)

$$F = 15\,000\,000 \text{ кгс} = 15\,000 \text{ тс}.$$

Такое штампованием можно было бы осуществить при помощи соответствующего мощного пресса.

Из приведенного примера видно, что дорогостоящее оборудование может быть заменено весьма дешевой взрывной штамповкой, которую можно реализовать в любом месте быстро, просто и эффективно.

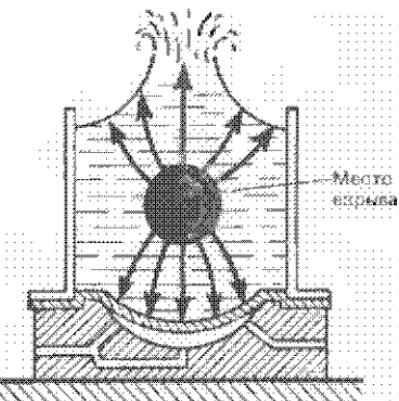
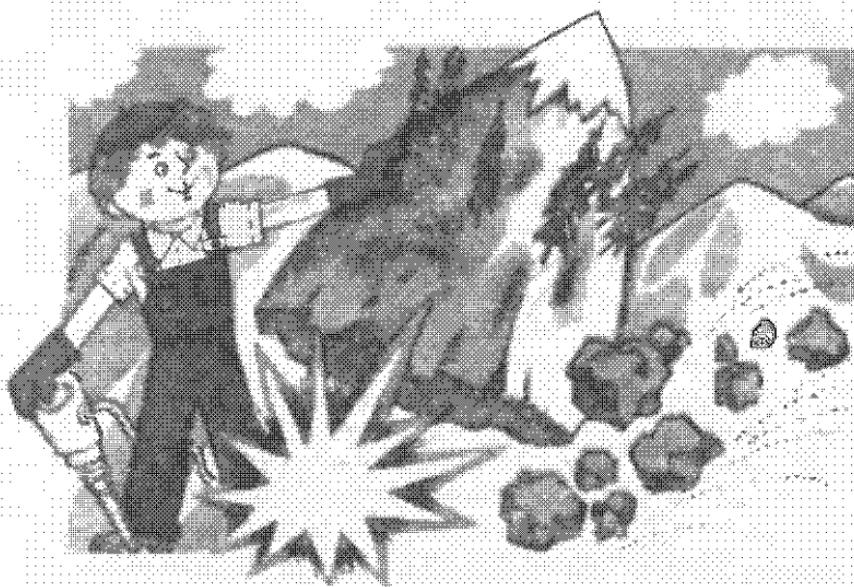


Рис. 31. Схема установки для штамповки подводным взрывом

Интересен такой факт. В 1943 году на строительство железной дороги нужно было срочно взорвать скалу. Буркового инструмента не было. Шпуры пришлось пробивать в скале взрывами тротиловых шашек с кумулятивными выемками. Для получения должной эффективности действия таких зарядов было необходимо ввести в выемки металлические оболочки. Эти оболочки изготавливались очень быстро на месте работ из листового железа при помощи штамповки взрывом. При этом в качестве матрицы применялись простые железные гайки с отверстием достаточно большого размера. Форма штампируемой облицовки создавалась автоматически действием достаточно сильного взрыва без необходимости иметь специально обработанную матрицу.



Способы размещения зарядов в горной породе

В течение веков взрыв для дробления, разрыхления и выброса пород применялся на основе практического опыта, а теория взрыва почти не использовалась на производстве.

Сейчас это положение резко изменилось. Теория взрыва в горных породах резко двинулась вперед. При этом советские ученые сыграли в этом деле решающую роль. Советская наука о взрыве вышла на передовые позиции во всем мире.

Взрывчатые вещества используются в горном и строительном деле для двух основных целей: для дробления и разрыхления крепких пород и для выброса или перемещения масс породы для образования определенных полостей (выемок) или дамб, плотин, перемычек, искусственных островов.

В обоих случаях необходимо обеспечить передачу максимальной энергии взрыва окружающей среде. С этой целью взрывчатое вещество должно быть расположено, как

НЕЗАМЕНИМЫЙ ПОМОЩНИК ГОРНИКА

правило, внутри массива той породы, на которую взрыв должен действовать.

Для этой цели перед взрывом в породе необходимо пробурить шпур (скважину) определенного размера.

Подготовка скважины для размещения взрывчатого вещества является очень важным звеном во взрывных работах, на что затрачивается много сил и средств. Время для этой подготовки является основным временем, затрачиваемым на взрывные работы в горных породах.

Поэтому форма и расположение скважин для размещения заряда ВВ должны удовлетворять не только требованиям, вытекающим из физики взрыва, но также требованиям по обеспечению наиболее экономичного и удобного производства работ при подготовке взрыва.

При производстве взрывов малого масштаба в твердых породах почти единственным видом емкости, предназначенней для размещения взрывчатого вещества, является цилиндрический шпур (или скважина), выбуриваемый в породе (рис. 32). Объем шпуря используется для размещения заряда, как правило, не полностью. Некоторая часть шпуря, более близкая к выходу (к устью), после заряжания заполняется пробкой из грунта, называемой *забойкой*.

Кроме того, в ряде случаев оказывается целесообразным оставить в шпуре пустые места, заполненные воздухом, так как такие полости способствуют эффективности действия взрыва, потому что создают возможность дополнительного перемещения породы (рис. 33). Более того, для усиления смещений породы и соответствующего увеличения разрушений породы бурят шпуры, которые оставляют при взрыве пустыми, т.е. не заряжают (рис. 34).

Существует также способ усиления действия взрыва при помощи устройства камер для размещения заряда большего объема по сравнению с объемом заряда. При этом взрывные газы передают энергию взрыва значительно большей поверхности породы, окружающей взрыв; давление существенно снижается, но масса породы, смещающаяся взрывными газами, увеличивается.

В этом случае уменьшается местное чрезмерное разрушение, дробление и нагревание породы, а также меньше энергии теряет ся вблизи заряда и за счет этого порода равномернее дробится и перемещается на более значительные расстояния от места взрыва.

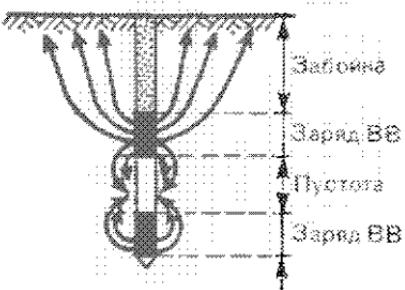
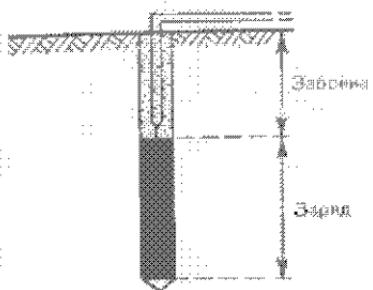


Рис. 32. Схема размещения заряда в шурфе
Рис. 33. Схема движения породы после взрыва заряда в шурфе с пустотой, разделяющей две части заряда

Таким образом, эффективность действия взрыва на породу в целом увеличивается и это может оправдать затраты на устройство дополнительного объема в камере, где размещается заряд.

Заряды могут располагаться в скважинах, пробуренных в породе на значительную глубину. Если же требуется увеличить объем камеры для размещения взрывчатого вещества, то это можно осуществить с помощью последовательных взрывов зарядов, помещаемых в скважине. Сначала небольшой заряд своим взрывом немного расширяет скважину в месте взрыва. Это место используют для введения туда более крупного заряда. Взрывая его, полость в породе значительно увеличиваются. В этой полости помещают еще более крупный заряд и таким образом увеличивают полость до необходимых размеров.

Основным препятствием к созданию очень крупных полостей является то, что они оказываются неустойчивыми и разрушаются под действием веса породы, вызывающей соответствующее горное давление. Поэтому при очень крупных взрывах, когда масса заряда составляет сотни и тысячи тонн, более рациональным следует считать размещение заряда в нескольких камерах ограниченных размеров или в достаточно длинных штольнях или шахтах.

В последние годы А.А. Черниговским предложены способы массовых взрывов при выбросе при помощи системы удлиненных зарядов, расположенных в соответствующих подземных выработках. При использовании камер увеличенного объема для повышения эффективности действия взрыва целесообразно

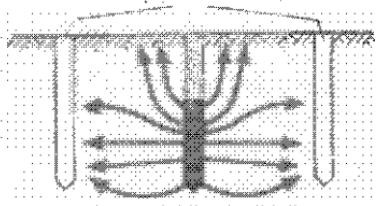


Рис. 34. Схема движущих пород после взрыва заряда в штуре, рядом с которым расположены незаряженные штуры

ности взрывных работ. В этом направлении особенно существенные результаты получены Н.В. Шустовым в Красноярске. Имеется также большой опыт, накопленный в работах, проводившихся в течение 20 лет Н.М. Сытым, который применил в качестве взрывчатого вещества пироксилиновые пороха, утратившие свои кондиционные свойства и изымаемые из применения в артиллерии. Эти пороха отлично взрываются в воде. При этом часть воды испаряется, на что затрачивается часть тепловой энергии. Однако водяные пары, расширившись, дополняют механическую работу расширяющихся взрывных газов. Это приводит к усилению действия взрыва на более дальних расстояниях от заряда.

Возможно усиление дробящего действия взрыва также путем увеличения камеры, где размещён заряд, без ее заполнения водой. В этом случае действие взрыва передается через воздух. Такой способ взрывания предложен Н.В. Мельниковым и П.Н. Марченко и детально разработан П.Н. Марченко. Его сущность состоит в том, что при замене воздухом слоя породы, непосредственно примыкающего к заряду, снимаются потери энергии взрыва на очень сильное дробление и перетирание этого слоя породы.

Разрушение породы вокруг места взрыва

Порода, внутри которой произошел взрыв, перемещается и уплотняется за счет давления взрывных газов. При этом происходит образование системы поверхностей скольжения.

В скальных породах, отличающихся жесткостью и хрупкостью, вокруг полости, оставшейся после взрыва, располагается

плотный заполнитель водой. Это обусловлено тем, что вода отлично передает оружейной среде энергию взрыва. При этом, однако, возникает затруднение, связанное с тем, что многие виды взрывчатых веществ не допускают увлажнения. Несмотря, однако, на эту трудность, во многих практических случаях оказывается возможным таким путем получить значительное увеличение эффективности взрывных работ.

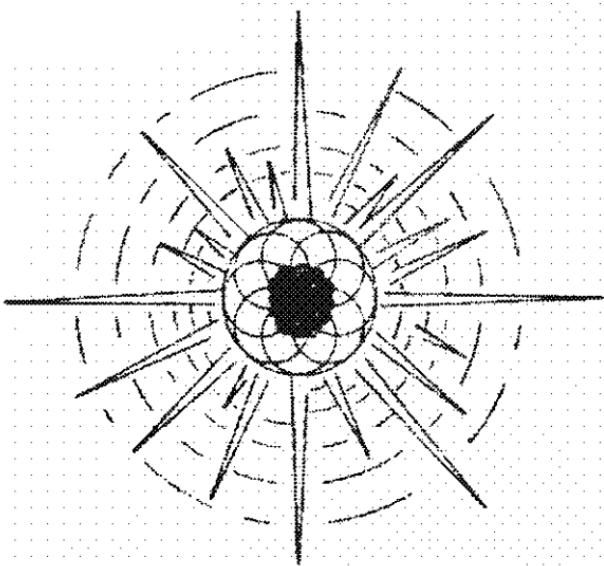


Рис. 35. Схема распределения трещин в породе около места взрыва

сферический слой мелко раздробленной и вместе с тем уплотненной действием взрыва породы. Этот слой пронизан поверхностями скольжения. Если произвести разрез породы, то эти поверхности будут иметь вид спиралей, идущих под углом 45° к радиусам, проведенным из центра взрыва (рис. 35).

За уплотненным слоем следует зона, пронизанная радиальными трещинами. Эти трещины расходятся в виде лучей, начинающихся на границе внутреннего уплотненного ядра. Между этими лучевыми трещинами обычно имеются и трещины, перпендикулярные к радиусам. Эти трещины возникают тогда, когда давление взрывных газов снижается и происходит небольшое смещение породы обратно к центру взрыва.

Очень наглядное и хорошо видимое распределение трещин около места взрыва можно получить, если взорвать внутри массивного блока из органического стекла небольшой заряд. Например, электродетонатор, введенный внутрь через просверленное углубление. Чтобы избежать разтрескивания всего блока, его лучше поместить в воду.

Если взрыв произведен вдали от свободной поверхности

породы и выброса породы не происходит, около места взрыва возникает шарообразная полость. Взрыв, не вызывающий выброса породы, называют обычно *камуфлетом* или *камуфлетным взрывом*. Образующуюся при таком взрыве полость нередко называют *камуфлетной полостью*. Объем этой полости пропорционален энергии, выделяемой при взрыве. Так как эта энергия, в свою очередь, пропорциональна массе заряда, то объем полости должен быть пропорционален массе заряда и удельной энергии взрывчатого вещества.

Если обозначить радиус камуфлетной полости для одного килограмма тротила через k_k , то радиус полости в любых условиях будет

$$R_k = k_k \sqrt[3]{q} \sqrt[3]{\frac{U_1}{U_{11}}},$$

где U_1 — удельная энергия примененного при взрыве взрывчатого вещества, а U_{11} — удельная энергия тротила.

Так как удельная энергия сравнительно мало изменяется при переходе от одних взрывчатых веществ к другим и в приведенной формуле эти величины стоят под знаком кубического корня, что еще снижает влияние удельной энергии, то в большинстве случаев можно считать, что

$$R_k = k_k \sqrt[3]{q}.$$

Величина k_k обычно равна $0.1 \div 0.4 \text{ м} / \sqrt[3]{\text{кг}}$ и зависит от прочности породы, в которой происходит взрыв.

Величина R_k может использоваться для оценки энергии, выделяемой при взрыве. Крупные камуфлетные полости обычно трудно сохранить. Их верхняя часть не выдерживает горного давления и обрушивается под весом вышележащей породы, прочность которой нарушена при взрыве.

Размеры зон сжатия R_c и растрескивания R_p пропорциональны радиусу камуфлетной полости. Приближенно можно считать, что

$$R_c \approx 2R_k \text{ и } R_p \approx 4R_k.$$

Взрывные волны в грунтах и горных породах

При взрыве в породе возникает взрывная волна, распространяющаяся во все стороны от места взрыва. Эта волна имеет мно-

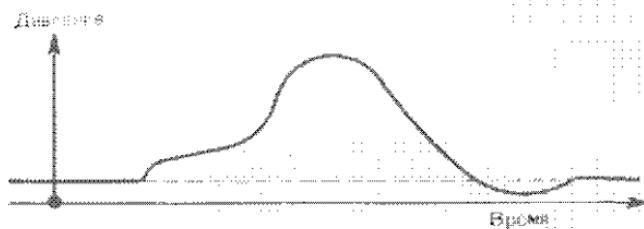


Рис. 36. График зависимости давления взрывной волны в грунте от времени

го общего со взрывными ударными волнами в воздухе и особенно в воде. Однако имеются и отличия, которые выражены тем сильнее, чем определенное выражена структура породы и чем эта порода является более пористой. Сущность таких отличий сводится к следующему. При небольших давлениях и деформациях структура породы сохраняется. Сжимаемость породы в этих условиях оказывается небольшой, поэтому при небольших давлениях скорость распространения сжатия в породе оказывается значительной.

При более значительных давлениях порода начинает разрушаться и ее сжимаемость существенно возрастает. Порода теряет свою жесткость. Вследствие этого скорость распространения волны, передающей более сильные давления, оказывается сравнительно небольшой.

При таких условиях на фронте волны вперед вырываются небольшие деформации и давления. Несколько позднее приходят более значительные смещения и давления. Таким образом, при прохождении волны через какой-либо участок давления в породе нарастают, а потом довольно плавно снижаются. Поэтому такие волны нельзя называть ударными. Название "ударные волны" сохраняется только там, где в головной части волны имеется скачок уплотнения (в рассматриваемом случае он отсутствует) и давление на фронте волны является максимальным.

Волны, в которых при взрыве постепенно нарастает давление, называют обычно *взрывными волнами* (рис. 36).

Величиной, определяющей действие взрывной волны в породе, является максимальное давление, создаваемое этой волной. Это давление проявляется в породе. Оно действует на площадку, которую можно мысленно выделить в породе, располагая эту площадку перпендикулярно к направлению распространения взрывной волны.

В этой формуле коэффициент $\frac{1}{150}$ зависит от того, в каких единицах выражены v_R и a . В приведенной формуле a_R выражено, как указано выше, в килограммах на квадратный сантиметр, а скорость — в метрах в секунду.

Существенное значение при действии взрыва в грунтах имеет смещение породы при прохождении взрывной волны. Это смещение приближенно равно

$$S_R = \frac{1}{2} v_R t.$$

На основании приведенных выше формул

$$S_R = \frac{F_0 Y}{3000} \left(\frac{1}{130} \frac{a}{R^3} - \frac{1}{250} \frac{a^{\frac{2}{3}}}{R^2} + \frac{1}{860} \frac{a^{\frac{1}{3}}}{R} \right).$$

В этой формуле, так же как и в следующей, плотность породы γ делится на 3000 для того, чтобы избежать слишком громоздких коэффициентов в выражении, стоящем в скобках.

Смещения удобнее выражать в миллиметрах. Тогда

$$S_R = \frac{F_0 Y}{3000} \left(7,7 \frac{a}{R^3} - 4 \frac{a^{\frac{2}{3}}}{R^2} + 1,2 \frac{a^{\frac{1}{3}}}{R} \right).$$

Таким образом, при взрыве 1 кг тротила на поверхности породы ($F_0 = 0,2$) смещения на расстоянии 1 м будут равны примерно 1 мм.

Если заряд длиной L , то для расчетов перечисленных величин v_R , t , v_R , S_R можно применить те же самые формулы, но в них необходимо ввести эквивалентный заряд, рассчитанный так же, как это выполнялось выше при расчетах параметров воздушной ударной волны.

Эквивалентный заряд равен $2 \frac{R}{L} a$ при условии $R < L$.

Рассмотренные здесь напряжения и смещения при взрыве относятся к твердым (искальным) горным породам. Сравнительно близки к ним напряжения и смещения в мягких водонасыщенных грунтах. Совсем иначе ведут себя мягкие грунты (глина, суглинок, песок), не вполне насыщенные водой, т.е. содержащие некоторое количество воздуха или других газов (например, метана). При распространении взрывной волны в таких мягких грунтах пузырьки воздуха сжимаются. Содержащийся в них газ при сжатии нагревается. Темпера от газа очень быстро

передается окружающей воде и частицам грунта. Таким путем теряется значительная часть энергии взрывной волны. Поэтому взрывная волна быстро ослабевает и напряжения становятся существенно меньшими, чем это можно наблюдать в скальных грунтах. Этот вопрос в последнее десятилетие детально исследован многими учеными во главе с Г.М. Пиховым.

Движение породы при взрыве

Скорости смещения породы от взрывной волны изменяются по направлению и возрастают по величине, если учесть влияние волны разрежения. В различных породах точно так же, как и при взрыве в воде, вблизи свободной поверхности возникает волна разрежения. Она возникает при отражении взрывной волны от поверхности и распространяется по направлениям радиусов, расходящихся из центра, расположенного на такой высоте над поверхностью породы, которая равна глубине расположения заряда.

После прохождения волны разрежения в породе возникает движение, соответствующее рассмотренной выше гидроэлектродинамической аналогии (рис. 37).

Однако полное повторение такой картины движения, которая характерна для воды, осуществляется только в весьма плотных и жестких горных породах, в водонасыщенных глинах, торфах и песках.

В более сухих, не насыщенных водой, мягких грунтах волна разрежения проявляется сравнительно слабо. Это обусловлено поглощением энергии взрывной волны в мягких грунтах при сжатии среды избыточным давлением. В соответствии с этим скорости движения к центру волны разрежения оказываются существенно меньше скоростей, возникающих под действием взрывной волны.

Чтобы построить систему линий движений породы, необходимо определить скорости движения по радиусам, идущим от заряда, по тем же формулам, какие приведены для воды. Необходимо только вместо плотности воды взять плотность соответствующей породы. Скорости же движений, направленные к центру волны разрежения, должны быть уменьшены в определенное число раз (n), которое можно определить из опыта.

Можно поместить на поверхности породы небольшие метки — маленькие колышки с флагами, нумерованные кубики и т.д.

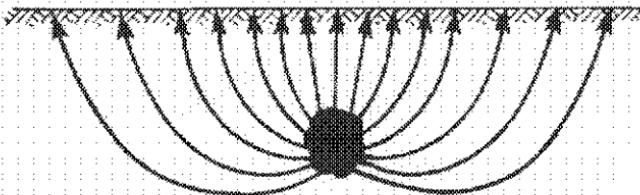


Рис. 37. Схема движения малосжимаемой (жесткой) породы после взрыва

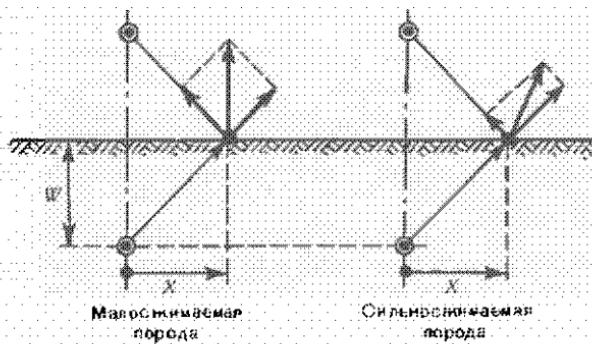


Рис. 38. Схема направлений движения породы на свободной поверхности после взрыва

При взрыве эти метки будут двигаться вместе с прилегающими к ним частицами породы. Если бы энергия волны сжатия и энергия волны разрежения были одинаковы, то скорости, создаваемые волной разрежения и волной сжатия, были бы на поверхности породы тоже одинаковыми. При их сложении возникали бы скорости, направленные точно вверх, перпендикулярно к свободной поверхности породы (рис. 38).

Если же скорости отклоняются от линии, проходящей через заряд, это свидетельствует о слабости волны разрежения.

Рассмотрим в качестве примера движение породы на расстоянии x , равном глубина ω заложения заряда от вертикали, которая проходит через него.

Взрывная волна, идущая от места взрыва, подходит к помещенному на поверхности месту под углом 45° к перпендикуляру. Если порода движется при этом не под углом 45° , а под некото-

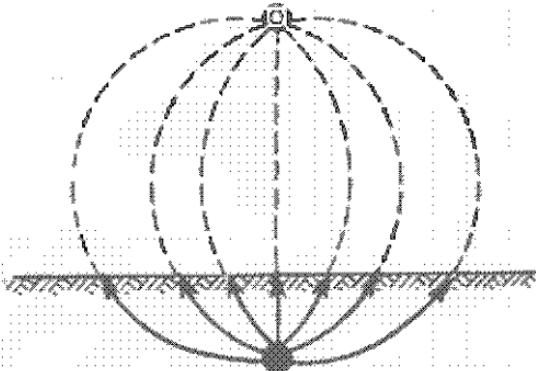


Рис. 39. Схема возможного приема для построения линий движения городы после взрыва при слабой волне разрежения.

рым углом α , который меньше 45° , то путем простого геометрического расчета можно определить величину π , указывающую степень ослабления волны разрежения по сравнению со взрывной волной:

$$\pi = \frac{1}{\sin(45^\circ - \alpha)}$$

Зная величину π , можно построить скорости движения различных точек породы вокруг места взрыва и на основе этих скоростей провести линии движения среды после взрыва.

Можно также с некоторым приближением получить картину движения породы, если поднять вверх центр волны разрежения над поверхностью породы на высоту, равную $w\sqrt{\pi}$ (рис. 39).

Скорости движения в различных точках породы различны. Поэтому движение породы не может происходить без деформаций и ее разрушений.

Дробление породы взрывом

Одним из основных направлений использования взрыва является дробление породы. Поэтому детальное рассмотрение физических основ дробления имеет очень большое теоретическое и практическое значение.

Рассмотрим сначала отдельные элементы этого процесса. Известно, что непосредственно около места взрыва возникает система трещин и, следовательно, происходит дробление породы. При этом возникают осколки, которые очень малы вблизи места взрыва, но быстро увеличиваются в размерах по мере удаления от него. Но и близко к месту взрыва происходит чрезвычайно неравномерное дробление.

Как правило, порода чрезмерно измельчается и на это бесполезно уходит немалая часть энергии взрыва. Именно это обстоятельство приводит к различным попыткам снизить перегрузку в породе возле места взрыва. Выше были указаны приемы решения этой задачи, например путем увеличения полости, где помещается заряд взрывчатого вещества.

Зона дробления имеет размеры, приблизительно в 4 раза превышающие размеры камуфлеющей полости. Для прочных скальных пород можно считать, что радиус зоны дробления для взрывчатых веществ средней мощности

$$R_{\text{др}} = 7 \sqrt[3]{\frac{q}{\sigma_p}},$$

где $R_{\text{др}}$ измерено в метрах, масса заряда q — в килограммах, временное сопротивление породы на разрыв σ_p — в килограммах на квадратный сантиметр.

Приведенная формула получается на основе следующего рассуждения.

Энергия, выделяемая зарядом, прямо пропорциональна массе его q .

Часть этой энергии идет на дробление породы в объеме, прямо пропорциональном $R_{\text{др}}^3$. На дробление каждой единицы объема затрачивается энергия, которую можно принять также прямо пропорциональной времененному сопротивлению дроблению породы $\sigma_{\text{др}}$.

Следовательно, общая энергия, идущая на дробление породы, должна быть прямо пропорциональна $R_{\text{др}}^3 \cdot \sigma_{\text{др}}$.

$$R_{\text{др}}^3 \cdot \sigma_{\text{др}} = \alpha q,$$

где α — коэффициент пропорциональности. Из этого уравнения находим

$$R_{\text{др}} = \sqrt[3]{\alpha} \sqrt[3]{\frac{q}{\sigma_{\text{др}}}}$$

Из опыта установлено, что $\sqrt[3]{\alpha} \approx 7$. При этих условиях получается приведенная выше формула.

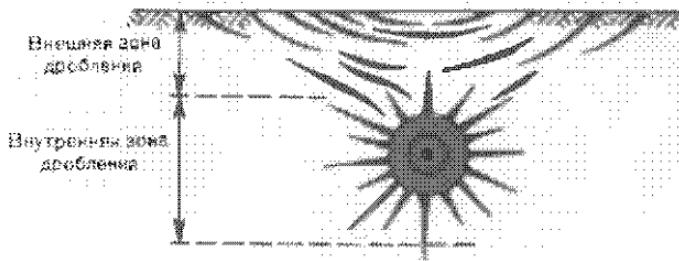


Рис. 40. Схема распределения трещин во внутренней и внешней зонах дробления

Если заряд расположен внутри породы на глубине, превышающей R_{do} , то внутренняя зона дробления до поверхности породы не доходит. Однако все же в слое породы, непосредственно примыкающей к поверхности, может возникнуть новая система трещин. Эти трещины резко отличаются от трещин внутренней зоны дробления (рис. 40).

Во внутренней зоне, как это указано выше, основные трещины расходятся радиально. Между тем в зоне дробления, примыкающей к поверхности породы, трещины располагаются примерно параллельно свободной поверхности. Точнее, во внешней, поверхностной зоне дробления трещины располагаются по сферическим поверхностям, имеющим центр совпадающий с центром волны разрежения. Этот центр, как указывалось выше, расположен на такой высоте над поверхностью породы, которая равна глубине заложения заряда.

Трещины, образующиеся во внешней зоне дробления, не вызываются действием волны сжатия. Сопротивление породы сжатию обычно достаточно велико. В то же время порода сравнительно слабо сопротивляется растяжению. Поэтому волна сжатия сама по себе дробления не производит. Она смещает слои породы. Это смещение продолжается и усиливается действием расширяющихся взрывных газов. При этом смещения происходят радиально, т.е. по направлениям, расходящимся из общего центра.

Очевидно, что при этом порода сжимается в радиальном направлении, но растягивается в направлениях, перпендикулярных к радиусам. Этим и обусловлено образование радиальных трещин в центроапплиной (внутренней) зоне дробления.

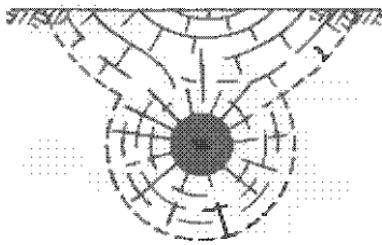


Рис. 41. Структура зоны дробления породы

жения могут разорвать породу и образовать внешнюю зону дробления.

Общие механические законы и соответствующий расчет приводят к выводу, что в рассматриваемых условиях должно возникнуть такое число трещин, которое равно отношению максимального радиального напряжения к временному сопротивлению породы на разрыв. Исходя из этого правила, можно считать, что внешняя зона дробления исчезает, если радиальные напряжения сжатия во взрывной волне не преодолевают временного сопротивления породы на разрыв. Впрочем, в горной породе, которая, как правило, является довольно неоднородной средой, во внешней зоне дробления возникает много других явлений, приводящих к разрушению породы. Это увеличивает внешнюю зону дробления, заканчивающуюся снаружи зоной растрескивания.

Такое образование трещин во внешней зоне дробления носит название "откола".

Зона растрескивания может иметь радиус у поверхности породы $R_{\text{рр}}$, равный примерно l . При этом максимальная глубина заложения заряда $l_{\text{так}}$, при которой еще возможно дробление во внешней зоне, равна приблизительно $2 R_{\text{рр}}$ (рис. 41).

Таким образом, раздробленный объем породы имеет форму, состоящую из двух частей. Внутри породы, ниже центра заряда, этот объем ограничен сферой с радиусом, равным $R_{\text{др}}$. Выше центра взрыва объем дробления ограничен поверхностью усеченного конуса с радиусом $R_{\text{др}}$ на уровне центра взрыва и с радиусом $2 R_{\text{др}}$ на поверхности породы.

Общий объем раздробляемой породы приближенно равен

$$V_{\text{др}} = 12 R_{\text{др}}^3.$$

В поверхностной, внешней зоне дробления происходят совершенно иные явления. Когда волна сжатия доходит до свободной поверхности породы, сжатая взрывной волной порода начинает быстро расширяться в сторону ее поверхности, подобно сильно сжатой и внезапно освобожденной пружине. При этом в породе возникают напряжения растяжения. Эти напряжения

Заменяя в этой формуле величину R_{dp} , по приведенной выше формуле можно написать

$$V_{dp} \approx \frac{400}{\sigma_p} q.$$

Если ввести в эту формулу поправку, позволяющую учесть удельную энергию взрывчатого вещества U_1 , то получится

$$V_{dp} \approx \frac{400 U_1}{\sigma_p U_{1T}},$$

где U_{1T} — удельная энергия тротила.

При взрывах на дробление большое значение имеет так называемая *проблема кусковатости*.

Под термином "кусковатость" понимают характер образовавшихся под действием взрыва кусков породы. Кусковатость прежде всего определяется размерами кусков. Как правило, получаемые при действии взрыва куски породы имеют неодинаковые размеры. Наиболее крупные куски получаются на границах зоны дробления. Неоднородность размеров кусков является серьезным недостатком, присущим взрывным работам. С этим недостатком пытаются бороться различными средствами — увеличением взрывных камер, устройством пустот в шпурах, применением холостых шпуров и пустот, как об этом уже было сказано выше.

Критическая скорость

При определении размеров кусков очень большое значение имеет расстояние между трещинами, образующимися в породе. Можно считать, что размеры кусков породы примерно равны расстояниям между трещинами даже тогда, когда эти трещины идут приблизительно параллельно друг другу. Это объясняется тем, что при разделении породы на части по этим основным трещинам возникают различные дополнительные разрушения и длинные или плоские осколки дополнительно дробятся на куски, размеры которых по различным направлениям приблизительно одинаковы.

Чтобы определить расстояния между трещинами в породе при действии взрыва, можно воспользоваться понятием *критической скорости* v_{kp} . Это понятие было введено в теорию взрыва О.Е. Власовым.

Чтобы в наиболее простой форме разъяснить это понятие, представим себе шарик, укрепленный на нити. Если бросить шарик, привязанный к нити, с определенной скоростью, то, пролетев некоторое расстояние, шарик натянет нить и, израсходовав на натяжение свою энергию движения, остановится. Если сообщить шарику более значительную скорость, то его энергия возрастет и он разорвет нить. Постепенно увеличивая скорость, можно выяснить, при какой минимальной скорости шарик разорвет нить. Эта минимальная скорость и будет критической скоростью для данной нити и шарика.

Представим себе теперь столбик из горной породы, закрепленный надежно на одном конце. Тем или иным способом другому концу столбика сообщают некоторую скорость. В силу инерции эта скорость будет сохраняться у столбика и он будет растягиваться как пружина. Если скорость растяжения столбика достаточно велика, то в нем могут возникнуть столь большие растягивающие напряжения, что образуется трещина и столбик разделится на две части. У каждой из этих частей будет на концах некоторая разность скоростей, в среднем равная $\frac{1}{2} v_0$, где v_0 — начальная скорость растяжения. Вторичные куски столбика будут, в свою очередь, дробиться. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не образуется определенное число разрывов N , которое равно отношению разности скоростей на концах столбика к критической скорости для соответствующей горной породы.

Величину *критической скорости* можно определить следующим образом. При растяжении бруска первоначальная энергия его движения равна

$$E_1 = a \frac{1}{2} \rho L S v_0^2,$$

где ρ — плотность материала бруска; L — его длина и S — площадь поперечного сечения бруска. Множитель a соответствует условиям расчета энергии движения, в частности, с учетом того, что скорость убывает от одного конца бруска к другому.

При растяжении бруска в нем возникнут напряжения растяжения. Энергия растяжения

$$E_2 = a \frac{\sigma^2}{2 \epsilon} L S,$$

где σ — максимальное напряжение в среднем сечении бруска; ϵ — модуль упругости материала бруска. Множитель a введен

для учета неравномерности в распределении напряжений (в середине — максимум, на концах — нуль).

Наибольшее растяжение будет достигнуто, когда вся энергия движения превратится в энергию напряженного состояния в бруске. Такое превращение энергии позволяет приравнять начальную энергию движения к энергии напряженного состояния в конце растяжения. Если считать, что при этом $\sigma \geq \sigma_p$ (σ_p — временное сопротивление разрыву), то бруск разорвется на две половины. Наименьшая начальная скорость, достаточная для разрыва бруска, может быть названа критической скоростью. Эта скорость определяется на основе равенства

$$E_1 = E_2$$

Заменив E_1 и E_2 их значениями, приведенными выше, получаем

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho L S v_{kp}^2 = \sigma \frac{\rho}{2\epsilon} L S$$

В этом равенстве вместо v подставлено v_{kp} , и вместе с $\sigma = \sigma_p$.

Из этого равенства находим

$$v_{kp} = \frac{\sigma_p}{\sqrt{\epsilon \rho}}$$

Умножим числитель и знаменатель в правой части на ϵ . Тогда можно написать

$$v_{kp} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}} \frac{\sigma_p}{\epsilon}$$

Величина $\sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}}$ приближенно равна скорости звука c в материале бруска. Поэтому можно написать

$$v_{kp} = c \frac{\sigma_p}{\epsilon}$$

Это значит, что критическая скорость в каком-либо материале приближенно во столько раз меньше скорости звука, во сколько раз временное сопротивление разрыву меньше модуля упругости.

Отношение $\frac{\sigma_p}{\epsilon}$ может считаться приблизительно постоянным для разных пород и равно около 0,0001.

Скорость звука в достаточно прочных горных породах тоже приблизительно постоянна и равна примерно 5000 м/с. Из этого следует, что для типовых скальных пород $\alpha \approx 0,5$ м/с.

Этой величиной можно воспользоваться для определения расстояния между трещинами в горной породе при взрыве.

Радиальные трещины образуются под углом α друг к другу, который можно определить из следующего равенства:

$$\sin \alpha = \frac{v_{kp}}{v_R}$$

или приближенно

$$\alpha \approx \frac{v_{kp}}{v_R},$$

где α измерена в радианах; v_R — радиальная скорость движения породы на расстоянии R от центра взрыва.

Если считать, что v_R может быть определена на основе предположения О.Е. Власова о возможности распространения электро-гидродинамической аналогии на взрыв в горных породах, то для расчета можно применить формулу, выведенную ранее для взрыва в воде. Нужно лишь в эту формулу подставить вместо плотности воды плотность соответствующей горной породы.

Учитывая приведенное выше значение α , получаем

$$\alpha \approx \frac{v_{kp}}{v_R} = R^2 v_{kp} \sqrt{\frac{2\pi\rho}{3R_0 b_0 U_1}}.$$

Можно учесть приводившееся раньше соотношение

$$R_0 = 0,05 \sqrt[3]{q},$$

отсюда

$$q = 8000 R_0^3.$$

Подставляя это значение в приведенную выше формулу для расчета α , получаем

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{2\pi\rho}{3b_0 U_1}} v_{kp} \left(\frac{R}{R_0}\right)^2.$$

Для взрывчатых веществ средней мощности и для горных пород с плотностью $\rho \approx 300 \frac{\text{техн. ед. массы}}{\text{м}^3}$ получаем приближенно (при $v_{kp} = 0,5$ м/с)

$$\alpha \approx \frac{1}{64} \left(\frac{R}{R_0}\right)^2.$$

Учитывая, что 1 радиан $\approx 57^\circ$, можно написать, что

$$\alpha \approx 1^\circ \left(\frac{R}{R_0} \right)^2.$$

Следовательно, на расстоянии, например, пяти радиусов заряда R_0 угол между радиальными трещинами будет равен $\alpha \approx 23^\circ$.

Следовательно, на этом расстоянии вокруг всего заряда должно образоваться 16 радиальных трещин (рис. 42).

Фактическое число трещин может быть и больше, потому что в местах, где прочность породы снижена, трещины могут раздваиваться и разветвляться более сложным образом. Однако приведенные расчеты все же дают общее представление о характере растрескивания породы под действием взрыва.

Если к внутренней зоне дробления прибавляется внешняя, расположенная близи свободной поверхности породы, то сетка трещин распределяется близи поверхности породы более равномерно.

Возможны случаи, когда взрыв в породе осуществляется таким образом, что свободная поверхность породы состоит из двух плоскостей, образующих друг с другом некоторый угол, часто близкий к прямому. В этом случае образуются две внешние зоны дробления. Это увеличивает эффективность действия взрыва. Дробление захватывает более значительный объем породы. Кроме того, равномерность дробления увеличивается. Наиболее сильные разрушения получаются при этом вблизи биссектрисы угла, образованного свободными поверхностями породы.

Наоборот, если свободная поверхность породы ограничена примыкающим массивом так, что свободный разлет кусков породы может произойти только по сравнительно небольшой части свободной поверхности, то эффективность действия взрыва соответственно снижается.

Влияние свободной поверхности породы на ее дробление осо-

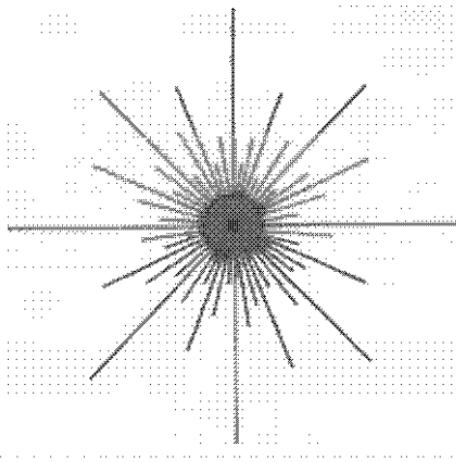


Рис. 42. Схема системы трещин в породе вокруг заряда

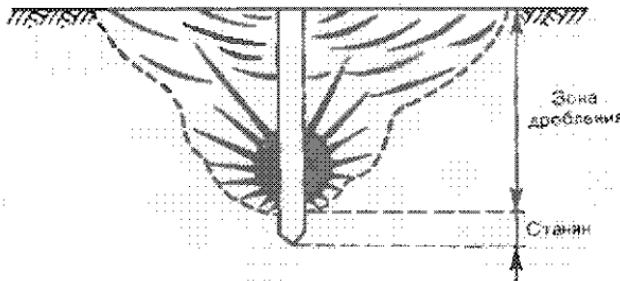


Рис. 43. Схема образования стакана при взрыве шпурового заряда в крепкой породе

бенно заметно при применении зарядов в шпурах сравнительно малого диаметра. В этом случае заряд взрывчатого вещества имеет удлиненную форму и центр заряда находится на заметном расстоянии от конца шпура. В целом картина дробления породы взрывом определяется расположением центра заряда. Кроме того, значительную роль в дроблении породы имеет внешняя зона дробления, обусловленная действием волны разрежения. В результате этого в обычных условиях практики порода дробится в достаточной степени, начиная от центра заряда вплоть до наружной поверхности.

Между тем в сторону массива породы дробление не распространяется на заметное расстояние, так как действия волны разрежения здесь нет: порода сопротивляется взрывной волне в условиях всестороннего сжатия. Поэтому нередко дробление даже не доходит до конца шпура. После того как куски породы, возникшие при взрыве, убраны, остается конец шпура, так называемый *стакан* (рис. 43).

Применение воздушных полостей в шпурах и холостых шпуров имеет целью создать сколо пустот, сделанных внутри породы, местные зоны дробления и таким способом увеличить объем раздробленной породы и обеспечить более равномерное дробление.

Короткозамедленное взрывание

Для обеспечения лучшего дробления породы можно производить взрыв зарядов в отдельных шпурах или скважинах не одновременно, а с некоторыми периодами замедлений в тысячные до-

ли секунды. Такое взрывание называется *короткозамедленным*.

Какова же физическая сущность явлений, происходящих при короткозамедленном взрывании?

Представим себе, что имеется массив породы, ограниченный плоской свободной поверхностью. В этом массиве пробурен на равных расстояниях и на равную глубину ряд параллельных скважин, в которые заложены одинаковые заряды ВВ.

Эти заряды можно взорвать одновременно. В этом случае происходит такое взаимодействие взрывных волн, идущих от отдельных зарядов, при котором давления внутри породы возрастают, но волны разрежения могут идти только от первоначальной свободной поверхности породы.

Если же ввести небольшое замедление взрывов зарядов с таким расчетом, чтобы происходило последовательное инициирование всех зарядов и взрыв каждого следовал бы за взрывом предыдущего через определенный промежуток времени, то каждый заряд будет разрушать породу, действуя не только в сторону свободной поверхности, но и в сторону только что образовавшейся зоны дробления соседнего заряда. Волны разрежения пойдут внутрь породы не только от свободной поверхности, но и из зоны дробления соседнего заряда. Трещины, возникшие при дроблении, будут действовать как дополнительные пустоты в породе.

Исходя из этого, можно определить требуемую величину замедления Δt взрыва каждого заряда по отношению к взрыву соседнего.

Это время должно быть достаточным для того, чтобы взрывная волна могла пройти через зону дробления и через эту же зону успела бы вернуться обратно волна разрежения, производящая основное разрушение породы. Необходимое для этого время состоит из двух частей: времени, затрачиваемого на движение взрывной волны от центра взрыва к свободной поверхности породы, и времени, затрачиваемого на движение волны разрежения от свободной поверхности породы до границы зоны дробления, расположенной внутри породы.

Граница зоны дробления находится на расстоянии от поверхности породы, близком к глубине заложения заряда w . Такое допущение нельзя считать очень точным. Однако при той точности расчетов, которая обычно принята в практике взрывного дела, это допущение можно принять.

Скорости распространения взрывной волны и волны разрежения в горных породах практически равны скорости звука. А это значит, что время замедления взрыва по сравнению с со-

седним в рассмотренной системе зарядов должно быть не меньше величины

$$\Delta t > 2 \frac{w}{c} .$$

Фактически время замедления, при котором короткозамедленное взрывание может дать наиболее полный эффект, должно быть примерно раз в 10 больше. Это обусловлено необходимостью дать время на перемещение породы и на развитие трещин.

При таких условиях можно написать

$$\Delta t \approx 20 \frac{w}{c} .$$

Необходимые для расчета скорости звука c в различных породах приведены ниже:

Порода	Песчаник	Известняк	Гранит	Диабаз
$c, \text{ м/с}$	3000—4000	4000—4800	5200—5500	5600

Описанные здесь основные особенности такого взрывания не исчерпывают всех сложных процессов, протекающих при воздействии короткозамедленных взрывов на горные породы.

Поэтому на практике целесообразно не только применять общетеоретические расчеты, но в каждом отдельном случае производить экспериментальное исследование. Оно должно состоять в проверке эффективности дробящего действия взрыва при различных значениях Δt , в частности таких, которые несколько превосходят величину, определяемую по полученной выше формуле. Однако теоретический расчет и при этом не теряет смысла, потому что он дает примерные величины времени замедления, которые не нужно искать заново на опыте, а надо только подвергнуть более тщательному уточнению и проверке.

Дробление крупных кусков породы

Крупные куски породы, образовавшиеся после взрыва, называемые негабаритными, требуют дополнительного разрушения. Эта задача, очевидно, может быть решена также с помощью взрывчатых веществ.

В этом случае можно либо пробуривать шпуры в негабаритных кусках и закладывать в них соответствующие заряды, а можно обойтись без бурения шпуром и взрывать заряды,

непосредственно накладываемые на поверхность куска (накладные заряды).

В последнем случае эффективность действия взрыва сильно снижается. Выше при рассмотрении взрывных волн в породе было указано, что при расчете параметров этих волн нужно вводить в формулы множитель F_0 , зависящий от глубины заложения заряда. Этот множитель равен единице, если заряд заложен на достаточно большую глубину. Если же заряд находится на поверхности, то $F_0 = 0,2$.

Таким образом, в первом приближении можно считать, что эффективность действия накладного заряда примерно в 5 раз меньше, чем заряда, взрываемого внутри породы. Однако, чтобы освободиться от необходимости применять буровой инструмент для бурения одиночных шпуров, выгоднее применить накладной заряд и увеличить расход взрывчатого вещества.

При этом следует отметить следующую характерную особенность. В крупных кусках породы обычно не наблюдается ярко выраженных явлений откола, но видно разрастание зоны растрескивания от места взрыва во все стороны до свободной поверхности. Кусок разрывается потому, что отдельные его части получают при взрыве движение, направленное в разные стороны.

Действие накладного заряда можно увеличить, обкладывая его сверху и сбоку влажной глиной или иным пластичным грунтом. Это создает условия, соответствующие некоторому заглублению в породу заряда, предназначенного для дробления.

Дробление негабаритных кусков может осуществляться легче, чем дробление массивной породы, вследствие того, что при достаточно крупном заряде внешние зоны дробления возникают со всех сторон, так как отражение взрывной волны происходит от всей поверхности куска.

При таких условиях снижение эффективности при применении накладных зарядов в значительной мере компенсируется увеличением зоны дробления.

О коэффициенте полезного действия при дроблении породы взрывом

Дробление породы взрывом может рассматриваться как особый технологический процесс переработки сырья, поэтому он должен быть с экономической точки зрения возможно более эффективным.

При взрыве заряда выделяется определенное количество

энергии. Эта энергия в значительной части передается породе и частично затрачивается на ее дробление.

Существенный интерес представляет при этом коэффициент полезного действия, т.е. число, указывающее, какая часть всей энергии взрывчатого вещества переходит в полезную работу дробления.

Расчет энергии, выделяемой при взрыве, не составляет каких-либо трудностей. Эта энергия равна

$$E_{\text{вв}} = qU_1.$$

Труднее определить энергию дробления. Однако приближенный расчет не встречает особых препятствий.

Если образец породы подвергается растяжению на прессе для испытания прочности, то прежде чем начнется разрушение, затрачивается некоторая энергия на растяжение. Эта энергия равна произведению средней растягивающей силы на то увеличение длины образца L , которое происходит при растяжении.

Сила при растяжении увеличивается по мере увеличения деформации. Обычно принимают, что горные породы подчиняются закону Гука:

$$E_p = \epsilon \frac{\delta}{L} S,$$

где величина ϵ называется модулем упругости и означает силу, которая была бы необходима для растяжения тела вдвое по длине, если бы тело могло выдержать такое растяжение; S — площадь поперечного сечения образца.

Большинство твердых тел разрушается при гораздо меньших деформациях.

Если происходит растяжение тела, то сила меняется от нуля до некоторого максимального значения F_p , поэтому среднее значение растягивающей силы равно $1/2 F_p$.

Работа растяжений будет равна

$$O_p = \frac{1}{2} F_p \delta.$$

На основе приведенной выше формулы для расчета F_p

$$\delta = F_p \frac{L}{\epsilon S}.$$

Подставляя значение δ в предыдущую формулу, получаем

$$O_p = \frac{F_p L}{2 \epsilon S}.$$

Величина F_p прямо пропорциональна растягивающему напряжению σ и площади поперечного сечения S растягиваемого тела:

$$F_p = \sigma E.$$

На основании этого можно написать

$$O_p = \frac{\sigma^2 S L}{2 \epsilon}.$$

Произведение SL есть объем V деформируемого тела. Поэтому можно считать, что энергия, необходимая для растяжения, пропорциональна его объему. На этом основании можно написать

$$O_p = \frac{\sigma^2}{2 \epsilon} V.$$

Если растяжение стало таким, что тело разрушается, разрываясь на части, напряжение σ становится равным временному сопротивлению на разрыв σ_p . Энергия, необходимая для разрушения, равна

$$O_p = \frac{\sigma_p^2}{2 \epsilon} V.$$

Коэффициент полезного действия взрыва на дробление породы составит

$$f_{dp} = \frac{O_p}{q U_1}$$

или

$$f_{dp} = \frac{\sigma_p^2}{2 \epsilon U_1} \frac{V}{q}.$$

Входящая в эту формулу величина $\frac{V}{q}$ указывает объем раздробленной породы, получаемый при взрыве 1 кг взрывчатого вещества. Обратная величина

$$\frac{q}{V} = q_1$$

называется *удельным расходом взрывчатого вещества на дробление породы*.

Можно написать

$$f_{\text{др}} = \frac{\sigma_p^2}{2eU_1} \frac{1}{q_1}$$

Удельный расход взрывного вещества средней мощности для дробления (рыхления) пород хорошо известен из практики. Он составляет для слабых скальных пород (известняк) $0,4-0,5 \text{ кг}/\text{м}^3$, а для крепких пород (гранит-базальт) — $0,6-0,7 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Можно принять сопротивление разрыву для слабых скальных пород $\sigma_p = 100 \text{ кгс}/\text{см}^2$ и для крепких пород $\sigma_p = 200 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Модуль упругости для слабых пород $e = 50\ 000 \text{ кгс}/\text{см}^2$, а для крепких пород $e = 100\ 000 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Примем также, что $U_1 = 400\ 000 \text{ кгс}\cdot\text{м}/\text{кг}$. Тогда можно произвести следующий расчет.

Переведем значения временного сопротивления разрыву в техническую систему единиц, т.е. отнесем их к квадратному метру. После этого определим коэффициенты полезного действия взрыва при дроблении породы.

Получаем для известняка $f_{\text{др}} = 0,0066 = 0,56\%$; для гранита $f_{\text{др}} = 0,0019 = 0,19\%$.

Проведенный здесь расчет, конечно, не может считаться достаточно точным. Однако общий смысл расчета не может измениться при его уточнении. Этот смысл сводится к тому, что на дробление породы расходуется очень малая доля энергии, выделяемая взрывчатым веществом. Остальная энергия в результате нагревания породы, ее перемещения рассеивается, уходит со взрывными газами и уносится вдали: взрывной волной в породу и ударной волной в воздух.

Таким образом, освоенные на практике в течение столетий способы дробления породы взрывом являются малоэффективным процессом с точки зрения энергетики, т.е. имеющим малый коэффициент полезного действия.

Этот вывод имеет очень важное принципиальное значение. Он указывает на то, что во взрывной технике имеются огромные резервы для очень большого повышения эффективности дробящего действия взрыва. Вместе с тем практика показывает, что многочисленные опыты и попытки добиться успеха в этой области пока не дали особенно заметных результатов. Это объясняется в основном тем, что в современных условиях всякий научный прогресс может быть осуществлен только в результате глубокого анализа физической сущности процессов, протекающих в природе и применяемых в технике.

Между тем во взрывном деле такой анализ развит недостаточно. Особенно слаба теория в тех областях взрывного дела, которые имеют многоэсковочные традиции и основываются до настоящего времени почти полностью на несколько устаревших эмпирических формулах.

Впрочем, и при таких условиях взрывные работы по дроблению крепких горных пород и других твердых материалов являются единственным возможным способом обеспечить добычу соответствующих полезных ископаемых, строительство подземных сооружений и многих других объектов на транспорте и в гидротехнике. Это обусловлено тем, что все средства механизации — экскаваторы, автоматические щиты для проходки туннелей и шахт и всю прочую сложную горную и строительную технику можно использовать только после того, как взрыв раздробит на достаточно мелкие куски массивы крепких горных пород.

Сосредоточенные и удлиненные заряды.

Системы зарядов

При различных видах взрывных работ применяют заряды различной формы. Широко распространены сосредоточенные заряды и заряды удлиненные, помещаемые в скважинах и шпурах. Кроме того, часто применяют системы удлиненных зарядов, взываемых одновременно и действующих так, как если бы в породе был взорван плоский заряд, расположенный в плоскости, проходящей через оси удлиненных зарядов.

При расчете действия таких зарядов нередко возникает вопрос о том, при каких условиях заряд может считаться удлиненным и как он должен быть рассчитан?

Ответ на такой вопрос можно получить исходя из допущения, что объем среды, разрушающей взрывом, зависит от массы и удельной энергии заряда, но не зависит от формы его.

При этом условии можно рассмотреть следующий случай. Пусть внутри породы имеется удлиненный заряд. При его взрыве порода разрушается в некотором объеме, который можно представить состоящим из цилиндрической части и двух полусфер, замыкающих с обоих концов эту часть. Полусферические объемы создаются действием концевых частей удлиненного заряда. При этом можно написать равенство

$$\pi R^2 b = 2/3 \pi R^3,$$

где A — радиус зоны действия взрыва; b — длина концевого участка удлиненного заряда, производящего действие в пределах полусфера с радиусом R .

Левая часть приведенного равенства является объемом зоны действия взрыва, который получился бы вдали от конца заряда на участке удлиненного заряда длиной b . Правая часть представляет собой соответствующий объем полусфера, получающейся, если участок удлиненного заряда длиной b находится вблизи его конца.

Из приведенного равенства следует

$$b = \frac{2}{3} R.$$

Это значит, что на концах удлиненного заряда можно выделить участки длиной каждый в $2/3 R$. Эти участки создают полусферические части зоны действия взрыва удлиненного заряда. Та же часть удлиненного заряда, которая находится между указанными концевыми частями, действует как удлиненный заряд, создавая цилиндрическую зону действия взрыва.

Из этой картины следует, что удлиненным заряд может считаться только при условии, что его длина L заметно превосходит величину, равную

$$L_{\text{кр}} = 2b = 4/3 R.$$

Наоборот, если длина заряда

$$L \leq 4/3 R,$$

то такой заряд действует как сосредоточенный.

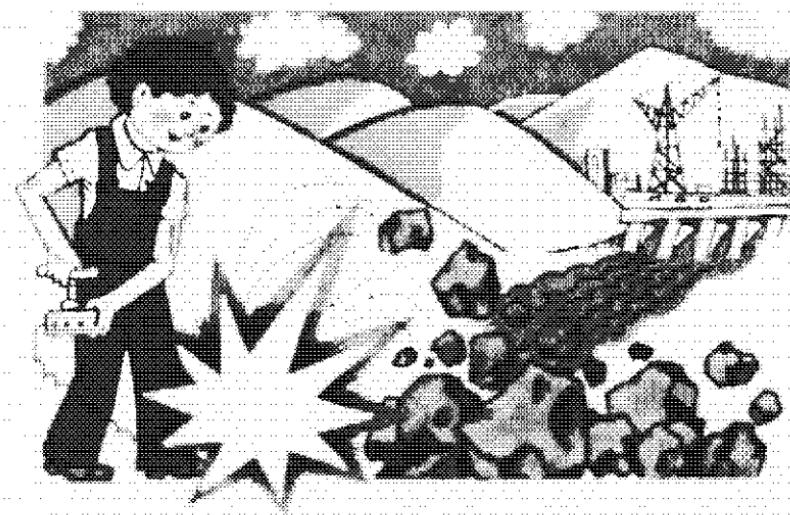
Исходя из этого же принципа, можно определить расстояние B между удлиненными зарядами, при котором эти заряды действуют совместно, как один плоский заряд. В этом случае можно написать

$$\pi R^2 L = 2 B R L.$$

Левая часть равенства представляет собой объем, в котором проявилось бы действие взрыва отдельного удлиненного заряда. Правая часть является тем объемом, в котором должно осуществляться действие того же количества взрывчатого вещества, являющегося частью системы удлиненных зарядов, работающих подобно плоскому заряду. Из приведенного равенства следует:

$$B = \frac{\pi}{2} R = 1,57 R.$$

Это значит, что удлиненные заряды должны располагаться на расстоянии друг от друга не более чем $1,57 R$, если при их совместном взрыве они должны действовать как плоский заряд.



Движение породы при начале выброса

Взрывы на выброс являются (наряду со взрывами для дробления пород) основным направлением использования взрывчатых веществ в горном и строительном деле. Вместе с тем взрывы на выброс породы имеют и общенаучное значение. При таких взрывах проявляются разнообразные законы газовой динамики и физики твердого тела. Образуемые при взрывах на выброс воронки имеют много общего с кратерами, образующимися при ударах метеоритов о поверхность земли и при извержениях вулканов. Со взрывами на выброс связана теория лунных кратеров.

Теории образования выбросов и теории движения породы при взрывах на выброс было посвящено в последнее время много исследований, выполненных К.П. Станюковичем, А.Ф. Беляевым, В.Н. Родионовым, А.А. Черниговским и многими другими учеными.

Глубокое исследование взрыва на выброс приводит к необходимости решения многих сложных физико-математических задач, кото-

ВЗРЫВ-СТРОИТЕЛЬ

рые выходят за пределы основных закономерностей, рассматривавшихся здесь.

Поэтому при рассмотрении взрыва на выброс в общем виде целесообразно придерживаться ряда упрощений, не искажающих сущности общего характера рассматриваемых явлений, но избавляющих от необходимости отвлекаться от главного, занимаясь громоздкими расчетами отдельных деталей.

Взрыв на выброс можно разделить на два этапа: сначала выбрасываемая порода приводится в движение взрывными газами; потом куски породы по отдельности или сплошной массой разлетаются в стороны, преодолевая сопротивление воздуха и падая вниз под действием силы тяжести.

Первый этап усложняется тем, что ускоряемая давлением взрывных газов масса породы движется и одновременно испытывает сложную деформацию и подвергается разрушению. Это приводит к потерям энергии и изменяет характер взаимодействия взрывных газов с окружающей породой.

Непосредственно после взрыва порода, расположенная во-круг заряда и между зарядом и свободной поверхностью, начинает перемещаться по кривым линиям, идущим от поверхности заряда к свободной поверхности породы. Вследствие этого полость, содержащая взрывные газы, постепенно увеличивается. Взрывные газы отдают свою энергию породе, охлаждаются и их давление быстро падает. Падение давления взрывных газов приводит к тому, что дальнейшее нарастание скорости породы прекращается. Обычно при этом выброса еще нет и на поверхности породы появляется только небольшое вспучивание. Это хорошо видно на кадрах киносъемки взрыва на выброс.

Дальнейшее движение породы осуществляется по инерции. Это движение и составляет *второй этап* выброса взрывом.

Первый этап выброса пород взрывом

При взрыве в породе возникает взрывная волна, которая движется весьма быстро — практически со скоростью звука. Эта волна достигает поверхности породы. При отражении от этой поверхности взрывная волна превращается из волны, сжимающей породу, в волну разрежения, вызывающую растяжение, растягивание и разрушение породы. При этом появляются небольшие куски породы, которые отрываются от поверхности и подскакивают вверх со значительной скоростью. Однако это нельзя считать началом выброса. Это только появление откола, вызываемого отражением взрывной волны.

При рассмотрении различных явлений взрыва в породе нередко возникает вопрос о том, в чем же проявляется действие первоначального удара взрывных газов и в чем заключается действие последующего расширения их.

Резкого разрыва между действием первоначального удара газов, т.е. взрывной волны, и последующего расширения газов не существует. Но при рассматриваемых процессах можно все же отметить первоначальное образование трещин и подскок осколков при отколе. Эти явления можно отнести к первоначальному действию взрывной волны.

Далее начинается постепенно нарастающее смещение больших масс породы — проявляется механическая работа расширяющихся взрывных газов.

Выше было указано, что движение породы при взрыве происходит в некотором соответствии с движением воды или распределением силовых линий электрического поля согласно закономерностям электротехнической аналогии.

При этом оказывается, что направления перемещения породы искривляются тем сильнее, чем более мощной является волна разрежения.

Искривление направлений движения породы имеет следующий характер.

Сначала это движение происходит по направлениям радиусов, расходящихся из центра взрыва. Далее линии движения все более и более отклоняются вверх, в сторону свободной поверхности породы, как бы стремясь найти себе выход наружу.

Чем сильнее действие взрыва, тем сильнее дробится порода и тем значительно изменяется структура ее под действием взрыва. При таких условиях большая часть энергии рассеивается в грунте и тем меньше ее остается для образования волны разрежения. Поэтому есть основание считать, что относительное значение волны разрежения уменьшается по сравнению с условиями взрыва на дробление породы. Отсюда можно предполагать, что и при взрыве на выброс линии движения породы будут меньше зависеть от влияния волны разрежения. Это значит, что эти линии будут более прямолинейными.

Приближенно можно предположить, что для выяснения общих принципиальных особенностей взрыва на выброс можно принять, что порода движется первоначально прямолинейно, по радиусам, расходящимся из центра взрыва.

Если при этом выделить в грунте отдельные элементы, имеющие форму вытянутых усеченных пирамид, движущихся по различным направлениям, то можно установить, что скорость дви-

жения этих пирамид будет различной. Наиболее быстро должна двигаться та пирамида, которая перемещается по линии, представляющей кратчайшее расстояние от центра заряда до свободной поверхности породы. Эта линия во взрывном деле называется линией наименьшего сопротивления. Такое название обусловлено тем, что по этой линии перемещается минимальная масса породы, оказывающая наименьшее сопротивление расширяющимся взрывным газам. Вследствие этого скорость перемещения породы зависит от направления движения ее.

Чтобы более точно представить себе рассматриваемое движение, необходимо учесть, что вблизи заряда образуется зона сильно раздробленной и после дробления сильно сжатой породы. Эта зона принимает на себя значительную часть энергии взрыва и, расширяясь, действует на наружные части выбрасываемой массы породы.

Таким образом, при сравнительно небольших первоначальных потерях энергии образуется масса, раздвигающая грунт и значительно превосходящая массу взрывных газов. Это увеличивает удельный импульс, передаваемый породе, в несколько десятков раз по сравнению с тем удельным импульсом, который передают взрывные газы в воздухе.

Основная же масса грунта движется как неугруженное тело. Это вытекает из принятого допущения о незначительности действия волны разрежения.

При таких условиях можно считать, что скорость v_{ψ} первоначального выброса породы должна быть по каждому направлению тем меньше, чем больше масса породы, находящаяся в пределах определенного элементарного телесного угла. Эта масса может быть принята прямо пропорциональной плотности породы ρ_p и расстоянию в кубе R_{ψ}^3 от центра заряда до свободной поверхности (измеренному в направлении, составляющем угол ψ от линии наименьшего сопротивления).

На основании сказанного можно считать, что первоначальная скорость выброса (направленная под углом ψ от линии наименьшего сопротивления) равна

$$v_{\psi} = B \frac{q}{\rho_p R_{\psi}^3},$$

где B — постоянная, пропорциональная удельной энергии взрывчатого вещества.

Можно считать на основе простого геометрического построения, что

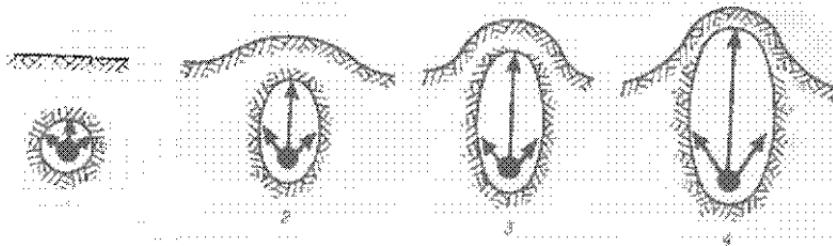


Рис. 44. Схема развития газовой полости при взрыве в породе

$$v_\varphi = B \frac{\sigma}{\rho_n w^3} \cos^3 \varphi,$$

где w — глубина заложения центра заряда в породе.

Скорость v_φ определяет движение центра тяжести каждой элементарной пирамиды, выделенной в массиве при выбросе. При движении эта пирамида будет раздавливаться под действием взрывных газов. Вследствие этого высота ее будет уменьшаться, а площадь поперечного сечения расти. Поэтому скорость движения внутренней поверхности элементарной пирамиды (на границе между породой и взрывными газами) будет больше v_φ . Скорость же внешней части элементарной пирамиды, примыкающей к свободной поверхности породы, меньше v_φ .

В результате такого движения полость, заполненная взрывными газами, будет очень быстро расширяться вверх по направлению линии наименьшего сопротивления и превращаться в удлиненный эллипсоид (рис. 44). В то же время будет происходить сравнительно медленное и незначительное выпучивание свободной поверхности породы.

Последняя формула позволяет составить представление об интенсивности вытягивания полости со взрывными газами по линии наименьшего сопротивления. Например, при $\varphi = 45^\circ$ $\cos \varphi = 0,71$. Следовательно,

$$\frac{v_\varphi = 0}{v_\varphi = 45^\circ} = \frac{1}{0,71^3} = 2,80.$$

Это значит, что расширение полости в сторону свободной поверхности происходит почти в 3 раза быстрее, чем движение под углом 45° к линии наименьшего сопротивления.

Исходя из рассматриваемой картины движения породы, можно установить, что при $\varphi \geq 90^\circ$ вообще никакого смещения породы не будет. Вследствие этого расширение полости, содержащей взрывные газы, будет происходить только вверх, или, точнее, только в сторону свободной поверхности. Некоторое расширение вниз за счет сжимаемости породы произойдет тоже, но оно осуществится по всем направлениям еще до начала общего смещения породы, во всяком случае до начала выпучивания свободной поверхности.

Второй этап выброса породы взрывом

После того как в породе распределяются скорости движения, дальнейшая передача энергии от взрывных газов породе прекратится. Более того, давление в продолжающих расширяться взрывных газах станет меньше давления окружающего атмосферного воздуха. Поэтому движущаяся порода должна будет в дальнейшем преодолевать избыточное давление воздуха и тратить на это значительную долю своей энергии.

Впрочем, в самом движении породы при переходе от первого этапа никакого скачка не происходит. Наоборот, газовая полость продолжает расширяться вверх, а свободная поверхность породы выпучиваться. При этом газовая полость выходит за пределы уровня свободной поверхности. Разрушенная порода образует при этом как бы растягивающуюся оболочку огромного пузыря. Эта оболочка состоит из множества осколков, летящих пока еще очень близко один от другого.

В этот момент начинается перестройка выбрасываемой массы породы. В верхней части газового пузыря летящие куски рассредоточиваются в первую очередь. Между ними воздух начинает прорываться внутрь газового пузыря, имеющего очень низкое давление. Куски породы при этом несколько изменяют пути своего движения и из их потока выделяются отдельные струи. Впереди такой струи обычно движется наиболее крупный кусок породы — "видер" струи. В основном он преодолевает сопротивление воздуха. В его попутную струю втягиваются более мелкие куски и облака пыли, возникающей при дроблении. Часть возникших таким образом струй может подняться на высоту, в десятки раз превышающую глубину заложения заряда.

Однако таким образом движется только малая часть всей массы породы, выброшенной взрывом. Она не определяет собой

характерных особенностей выброса, важных для практики. Более того, столь высокий подъем отдельных кусков следует считать вредным явлением потому, что он связан с большими потерями энергии взрыва.

Основная часть породы образует как бы основание оболочки газового пузыря, рассматриваемой нами. Здесь слой кусков породы тоньше и плотнее и образование отдельных стреловидных струй выражено слабо.

В то время как верхушка оболочки кусков породы распадается на потоки струй, вокруг места взрыва остается как бы огромная, сравнительно узкая, но очень высокая кольцевая волна, напоминающая волну, образующуюся при падении камня в воду. Такую волну обычно называют базисной. Это название обусловлено тем, что эта волна окружает снизу высокий султан выбрасываемой породы (рис. 45).

Базисная волна охватывает объем, в котором находились взрывные газы. В момент, когда базисная волна формируется, взрывные газы уже смешиваются с воздухом.

Нижняя часть поверхности, ограничивавшей газовый пузырь, превращается постепенно в донную часть воронки выброса.

В дальнейшем базисная волна начинает опрокидываться подобно высокой водяной волне набегающей на пологий берег. Падение такой волны приводит к образованию кольцевого нациала раздробленной породы вокруг воронки, образованной взрывом (рис. 46).

Часть кусков, поднятых вверх и образовавших центральный султан, при обратном падении попадает в воронку и образует на дне ее сравнительно тонкий и рыхлый слой раздробленной породы.

За кольцевым нациалом, простирающимся сравнительно недалеко за пределами воронки (примерно в 4–5 радиусах воронки), имеется зона, где падают отдельные куски породы, которые попали при выбросе в струи, образовавшиеся позади особенно крупных и тяжелых "лидеров", способных легко преодолевать сопротивление воздуха.

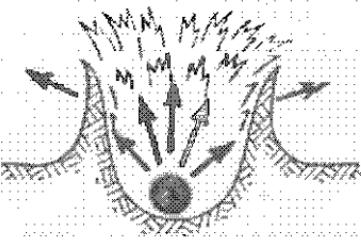


Рис. 45. Схема выброса породы взрывом

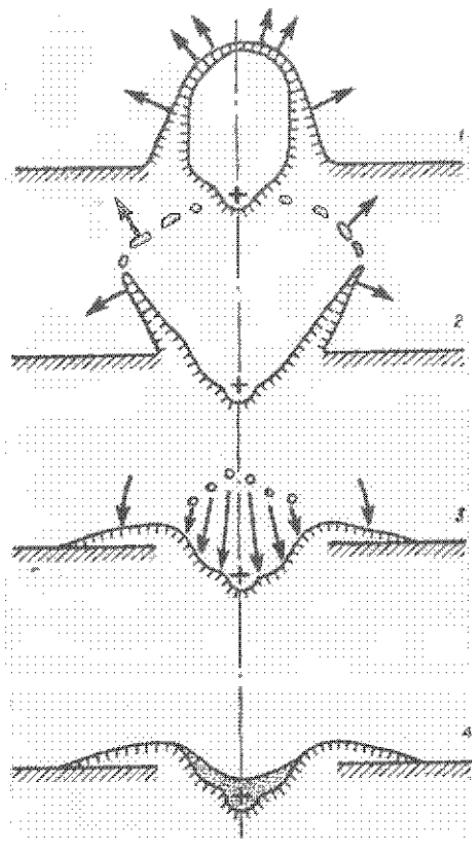


Рис. 46. Последовательные этапы образования воронки выброса

Расчет размеров воронки, образующейся в результате взрыва

Рассмотренная картина образования воронки при взрыве дает основания для расчета размеров ее в зависимости от массы заряда Q , глубины его заложения w и плотности породы ρ_p .

Раздробленная порода движется под действием взрывных газов по разным направлениям с неодинаковыми скоростями. В зависимости от полученной скорости она может подняться на ту или иную высоту. Можно считать, что скорость, полученная

породой, движущейся вдоль откоса будущей воронки, достаточно, чтобы выбросить ее за край воронки, т.е. чтобы поднять центр тяжести этой породы до уровня центра тяжести навала, окружающего воронку.

Можно считать приближенно, что воронка имеет форму конуса, вершина которого совпадает с центром взрыва, а высота равна w .

Центр тяжести такого конуса находится на глубине $1/4 w$ под свободной поверхностью породы. Учитывая необходимость дополнительно поднять породу для образования навала вокруг воронки, высоту подъема породы у края воронки можно принять равной $1/3 w$. Согласно законам динамики для подъема на такую высоту необходимо сообщить породе скорость

$$v_y = \sqrt{\frac{2}{3} gw},$$

где g — ускорение свободного падения тела.

Скорость v_y должна быть направлена вертикально вверх. Действие взрыва сообщает раздробленной породе движение на краю воронки под некоторым углом. Поэтому для получения полной скорости v_ϕ породы при условии, что ее вертикальная составляющая равна v_y , необходимо чтобы

$$v_\phi = v_y \frac{\sqrt{w^2 + R_b^2}}{w}.$$

где R_b — радиус воронки, измеренный на уровне первоначальной свободной поверхности породы.

На основе последних формул можно написать

$$v_\phi = \sqrt{\frac{2}{3} gw} \frac{\sqrt{w^2 + R_b^2}}{w}.$$

Ранее нами было установлено, что

$$v_\phi = B \frac{q \cos^3 \varphi}{\rho_p w^3}.$$

Приравнивая друг к другу правые части двух последних равенств, получаем

$$\sqrt{\frac{2}{3} gw} \frac{\sqrt{w^2 + R_b^2}}{w} = B \frac{q \cos^3 \varphi}{\rho_p w^3}.$$

Можно также написать

$$\cos \varphi = \frac{w}{\sqrt{w^2 + R_B^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_B}{w}\right)^2}}$$

Отсюда следует

$$\sqrt{\frac{2}{3} g w} = B \frac{q \cos^2 \varphi}{\rho_n w^2} = B q \frac{1}{\rho_n w^3 \left[1 + \left(\frac{R_B}{w}\right)^2\right]^2}$$

Из этого уравнения можно определить

$$q = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} g} \rho_n}{B} w^{\frac{7}{2}} \left[1 + \left(\frac{R_B}{w}\right)^2\right]$$

Приведенную формулу можно перестроить так:

$$q = \frac{\rho_n g \sqrt{\frac{2}{3} g}}{B g} w^{\frac{7}{2}} \left[1 + \left(\frac{R_B}{w}\right)^2\right]^2$$

Величина $\rho_n g = \gamma_n$, где γ_n — плотность породы, кг/м³.

Величина $\frac{R_B}{w} = n$ указывает, во сколько раз радиус воронки больше глубины заложения заряда (линии наименьшего сопротивления) и называется обычно показателем выброса.

Кроме того, можно написать

$$\frac{B}{4} g \sqrt{\frac{2}{3} g} = A_{вз}$$

где $A_{вз}$ — постоянная для взрывчатых веществ, имеющих примерно одинаковую величину удельной энергии.

При этих условиях

$$q = \frac{\gamma_n}{A_{вз}} w^{\frac{7}{2}} \left(\frac{1+n^2}{2}\right)^2$$

Из этой формулы видно, что масса взрывчатого вещества, необходимая для получения заданной воронки, прямо пропорциональна плотности породы, в которой производится взрыв, и глубине заложения заряда в степени 7/2. Между тем объем выбрасываемой породы также прямо пропорционален w^3 . Следовательно, масса заряда возрастает быстрее, чем объем выбрасываемой породы. Это объясняется тем, что, чем глубже

должна быть воронка, тем больше энергии надо затратить, чтобы преодолеть силу инжесты.

Во взрывном деле особое значение имеет тот случай, когда $n = 1$, $w = 1$ м. В этом случае объем конической воронки

$$v = \frac{1}{3} \pi R^2 w = \frac{3.14}{3} 1 \cdot 1 \approx 1 \text{ м}^3.$$

Следовательно, заряд, необходимый для образования такой воронки, можно рассматривать как удельный расход $k_{вз}$ взрывчатого вещества на выброс при $n = 1$.

Воронка, у которой

$$R = w \text{ и } n = 1,$$

называется *воронкой нормального выброса* или *нормальным горном*¹.

При этих условиях

$$q = k_{вз} = \frac{\gamma_n}{A_{вз}}.$$

Сопоставляя последнюю формулу с опытными данными, можно видеть, что действительно удельный расход ВВ на выброс при нормальном горне $k_{вз}$ оказывается прямо пропорциональным плотности породы. Эта зависимость распространяется как на скальные породы, так и на мягкие грунты.

Механическая прочность породы здесь практически заметного влияния не оказывает. Формулы, выведенные в этом разделе, применимы для расчета очень крупных зарядов.

Анализ формулы для расчета заряда,
предназначенного для выброса породы

В теории и практике взрывного дела для расчета заряда имеется ряд формул, основанных на несколько иных предположениях и поэтому несколько расходящихся с формулой, полученной ранее.

Сопоставим наиболее широко известную в практике советского взрывного дела формулу М.М. Борескова с полученной выше.

Эта формула была выведена во второй половине прошлого

¹ Горн — старинное военно-инженерное название воронки, создаваемой взрывом.

века на основе обработки многочисленных экспериментальных исследований. Впрочем, хотя формула и основывалась на большом числе опытов, эти опыты были проведены со сравнительно близкими по массе зарядами, воронки также получались близкие по размерам. Поэтому М.М. Боресков не мог заметить, что масса заряда должна возрастать быстрее, чем объем выброшенной породы, и принял, что он прямо пропорционален объему воронки. Кроме того, не производя теоретического анализа, он подобрал выражение для учета показателя выброса путем сопоставления простейших формул с данными опытов, проведенных в сравнительно узких рамках.

При таких условиях М.М. Боресков получил формулу

$$q = k_{\text{вз}} w^3 (0,4 + 0,6l^3).$$

Величина, стоящая в скобках, называется обычно *функцией показателя выброса*. Эта функция сравнительно мало отличается от соответствующего выражения, входящего в формулу, выведенную выше, и имеющего вид

$$\left(\frac{1 + l^2}{2} \right)^2 \approx (0,5 + 0,5l^2)^2.$$

Это видно из следующих данных:

l	0,8	1	1,5	2	3
$0,4 + 0,6l^3$	0,7	1	2,4	5,2	16,2
$(0,5 + 0,5l^2)^2$	0,8	1	2,6	6,25	25,0

Таким образом, при той степени точности, которая требуется от обычных расчетов во взрывном деле, можно считать, что обе приведенные формулы достаточно близки. Это особенно заметно, если рассмотреть такой случай. Взяты одинаковые заряды, заложенные на одинаковую глубину, рассчитаны радиусы воронок $R_{\text{вз}}$ для одного заряда по первой из приведенных формул, а для другого — по второй. Сильно ли разойдутся значения этих радиусов?

Согласно первой формуле следует, что радиус воронки равен

$$R_{\text{вз}} = w \sqrt{2 \frac{q}{k_{\text{вз}} w^2}} = 1.$$

Согласно второй формуле (автор М.М. Боресков)

$$R_{B2} = w \sqrt[3]{\frac{q}{0.6 k_{B3} w^3}} = \frac{2}{3}.$$

Если $q = 1 \text{ кг}$, $k_{B3} = 1 \text{ кг}/\text{м}^3$, $w = 1 \text{ м}$, то $R_{B1} = 1 \text{ м}$, $R_{B2} = 1 \text{ м}$.

Если $q = 10 \text{ кг}$, $k_{B3} = 1 \text{ кг}/\text{м}^3$, $w = 2 \text{ м}$, то $R_{B1} = 1.78 \text{ м}$, $R_{B2} = 2.24 \text{ м}$.

Из приведенных чисел видно, что результаты или совпадают, или расходятся на величины порядка $\pm 10\%$ от соответствующего среднего значения.

Это еще раз указывает на практическую близость рассмотренных формул.

Все сказанное справедливо для сравнительно небольших зарядов. При увеличении массы заряда и соответствующей глубины его заложения формула М.М. Борескова дает явно заниженные величины.

Например, если $w = 50 \text{ м}$, $k_{B3} = 1 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $l = 2$, получаем по первой формуле

$$q_1 = 520\,000 \text{ кг} = 520 \text{ т}.$$

По второй формуле

$$q_2 = 525\,000 \text{ кг} = 525 \text{ т}.$$

Здесь расхождение более чем в 10 раз.

Значительный практический опыт, накопленный за последнее десятилетие советскими учеными и инженерами-взрывниками (в частности, массовые взрывы, проведенные под руководством М.М. Докучаева) показал, что для крупных зарядов формула М.М. Борескова явно непригодна. Необходимы формулы, дающие повышенные значения массы заряда q , чтобы учесть влияние силы тяжести на выброс породы из очень глубоких воронок.

Помимо приведенной выше простейшей формулы в последнее время появился и ряд других, удовлетворяющих указанному требованию. В частности, можно указать на способ расчетов крупных зарядов, приведенный в работе Г.И. Покровского и А.А. Черниговского "Расчет зарядов при массовых взрывах на выброс".

К сожалению, теоретическое обоснование этого способа расчета существенно сложнее, чем вывод формулы, приведенной выше, и менее удобно для выявления основных особенностей физической сущности явления выброса.

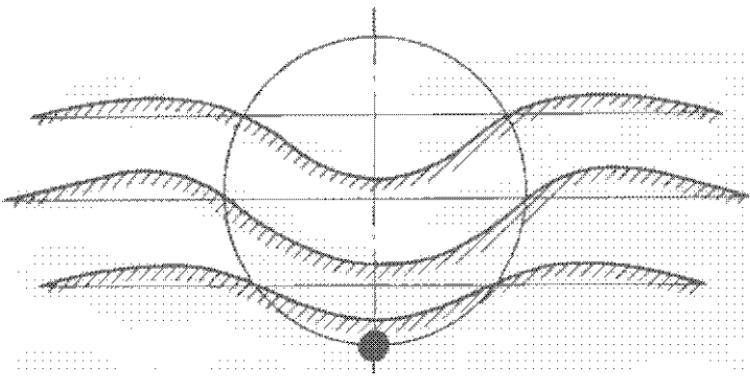


Рис. 47. Диаметры воронок, полученных при взрыве заряда на различной глубине (укладываются на окружности, проходящей через центр заряда)

В заключение отметим еще одну приближенную закономерность, объединяющую все воронки выбора при взрывах в одной и той же породе зарядов различной массы, помещенных на различной глубине.

Если начало координат поместить в центре заряда, а диаметры всех воронок (на уровне поверхности породы) разделить на массу заряда в степени $7/2$, то через концы всех приведенных к одному масштабу диаметров воронок можно провести одну общую окружность. Это показано на рис. 47.

Формулы, выведенные выше, показывают, что масса заряда, необходимого для того, чтобы получить при взрыве воронку заданных размеров, оказывается пропорциональной корню квадратному из ускорения свободного падения тела g . Это дает основание для прогнозирования действия взрыва на породу вне земной обстановки на различных небесных телах. В первом приближении можно считать, что ускорение свободного падения тела пропорционально радиусу небесного тела. Отсюда следует, что масса заряда, необходимого для получения заданной воронки, можно приближенно считать пропорциональным корню квадратному из радиуса того небесного тела, на котором производится взрыв. Таким образом, для взрывных работ с выбросом породы на Луне потребуются значительно меньшие заряды, чем на Земле. Еще существенно меньше будут заряды для осуществления крупных взрывных работ на малых планетах солнечной

системы, называемых астероидами. При этом части выбрасываемого из воронки грунта вообще не падает обратно на небесное тело, а превращается в систему искусственных спутников соответствующего небесного тела или даже улетает за пределы его зоны притяжения.

Расчеты линейных зарядов для выброса породы

Если имеется удлиненный заряд, длина которого L существенно превосходит глубину его заложения w , то рассчитать массу этого заряда можно исходя из полученных ранее результатов, когда рассматривался сосредоточенный заряд. Удлиненный заряд дает практически тот же расход взрывчатого вещества, как и линейный, заложенный на соответствующей глубине.

При взрыве линейного заряда образуется длинная выемка приблизительно треугольного профиля с глубиной, равной глубине заложенного заряда. Если половина ширины этой выемки равна радиусу воронки, получаемой при взрыве сосредоточенного заряда, то одинаковый удельный расход взрывчатого вещества осуществляется тогда, когда длина участка линейного заряда L_q , соответствующая по массе сосредоточенному заряду Q , удовлетворяет равенству

$$\frac{\pi}{3} R_v^2 w = \frac{1}{2} 2 R_v w L_q.$$

Левая часть этого равенства является объемом воронки, а правая — объемом участка выемки длиной L_q , имеющей такую же крутизну откосов, как и у воронки.

Принимая приближенно, что $\pi \approx 3$, получаем из приведенного равенства

$$L_q = R_v.$$

Отсюда следует, что на единицу длины линейного заряда необходимо уложить заряд, равный

$$Q_1 = \frac{Q}{L_q} = \frac{Q}{R_v}.$$

При этом заряд Q необходимо определить по первой из приведенных выше формул.

Таким образом, получается

$$Q_1 = k_{03} w^{\frac{5}{2}} \frac{w}{R_v} \left(\frac{1+n^2}{2} \right)^2.$$

Как указано выше, величина $\frac{B}{w} = n$. Распространяя это обозначение и на расчет линейного заряда, можно написать

$$q_1 = k_{\text{вз}} w^{\frac{5}{2}} \frac{1}{n} \left(\frac{1+n^2}{2} \right)^2.$$

Эта формула показывает, что при расчетах линейных зарядов количество взрывчатого вещества на единицу длины возрастает медленнее при росте глубины заложения, чем при расчете сосредоточенных зарядов. Увеличение показателя выброса также менее сильно влияет на массу удлиненного заряда по сравнению с сосредоточенным.

Системы линейных зарядов (плоские заряды)

Внимание теоретиков и практиков в последнее время привлекли системы линейных зарядов, расположенных в параллельных наклонных штолнях или скважинах. При этом штолни или скважины должны быть расположены не дальше друг от друга, чем на глубину их заложения. В этом случае при взрыве системы таких зарядов весь массив породы, находящийся над этими зарядами, вовлекается в движение без чрезмерного дробления или деформации. Такие системы зарядов, образующих как бы сетку, заменяющую плоский заряд, введенный в породу, являются оригинальным достижением советской науки о взрыве.

Эти заряды могут быть с особенным успехом применены при взрывах на выброс, производимых на откосах. Такие взрывы являются типовым видом взрывных работ при вскрытии месторождений полезных ископаемых и подготовке их для разработки открытым способом.

При применении системы линейных разрядов движение горной породы при взрыве существенно отличается от того, что происходит при выбросе сосредоточенным или линейным зарядом. Система линейных зарядов приподнимает весь пласт породы, лежащий над сетью линейных зарядов как единое целое, и сообщает всему этому массиву движение в одном направлении. Если при этом первоначально весь массив лежит наклонно на откосе горы, то под действием взрыва он поворачивается подобно листам книги, когда книгу открывают (см. рис. 47).

В рассматриваемых условиях энергия, необходимая для перемещения породы, затрачивается на поднятие центра тяжести массива породы на такую высоту, которая соответствует верти-

кальному положению перемещаемого пласта. Дальнейшее движение породы может происходить уже под действием силы тяжести.

Высота подъема центра тяжести пласта, имеющего постоянную толщину, равна

$$y = L(1 - \sin \beta),$$

где β — угол между плоскостью откоса и горизонтом.

Энергия, необходимая для подъема на такую высоту единицы объема породы,

$$y \gamma_p = L \gamma_p (1 - \sin \beta),$$

где γ_p — плотность породы. Чтобы получить эту энергию, необходимо обеспечить удельный расход взрывчатого вещества, равный

$$k_{\text{вз}} = \frac{L \cdot \gamma_p (1 - \sin \beta)}{f_{\text{дв}} U_1},$$

где $f_{\text{дв}}$ — коэффициент полезного действия взрыва при сообщении породе энергии движения, а U_1 — удельная энергия применяемого взрывчатого вещества.

Определение таким способом удельный расход взрывчатого вещества, нетрудно найти и общую массу всего заряда, который должен быть размещен под наклонным пластом сбрасываемой породы. Общая масса заряда

$$q_0 = k_{\text{вз}} L H x,$$

где x — длина участка, измеренная по основанию или гребню откоса, в пределах которой производится сброс породы взрывом.

Можно также написать

$$q_0 = \frac{L^2 H x \gamma_p (1 - \sin \beta)}{f_{\text{дв}} U_1}.$$

При практических расчетах наибольшая трудность возникает вследствие неопределенности значения $f_{\text{дв}}$. Ввиду того что в рассматриваемой области пока еще не накоплено достаточного количества практических данных, их целесообразно определять на месте, производя в уменьшенном масштабе опытные взрывы и подбирая такие заряды, которые могли бы перевернуть отбра-

сываемый пласт породы, без его чрезмерного дробления или далекого перемещения.

Ориентировочно можно предполагать, что значение $f_{\text{дв}}$ должно быть от 0,05 до 0,10.

Определенное описанным путем количество взрывчатого вещества необходимо распределить в наклонных или горизонтальных штолнях, проходящих на разных расстояниях, которые не должны находиться друг от друга дальше чем на расстоянии, равном толщине вышележащего слоя породы, который должен быть сброшен взрывом.

Взрывчатое вещество не следует равномерно размещать по длине всех штолен. Нужно учесть, что верхняя часть пласта должна быть брошена при взрыве наиболее далеко. Нижняя же часть практически не смещается вовсе. Поэтому взрывчатое вещество необходимо распределить так, чтобы на единицу длины штолни его было бы на верху вдвое больше, чем в середине. Книзу количество взрывчатого вещества на единицу длины штолни должно постепенно сходить к нулю. Практически это означает, что внизу следует сохранить такое минимальное количество ВВ, которое необходимо, чтобы обеспечить надежную детонацию.

Коэффициент полезного действия при взрывах на выброс

Затронутый в предыдущем разделе вопрос о коэффициенте полезного действия при взрывах на выброс породы имеет также и общее значение потому, что позволяет получить представление о технической и экономической эффективности взрывных работ при выполнении земляных работ с помощью взрыва.

При взрывах сосредоточенных зарядов порода выбрасывается из воронки на окружающую местность и образует вокруг краев выемки навал некоторой высоты. Как было указано выше, центр тяжести выбрасываемой породы поднимается на высоту, равную приблизительно $1/3 w$, где w — глубина заложения заряда.

При этом совершается работа по поднятию породы, равная произведению массы всей породы на указанную высоту подъема. На единицу объема расходуется в среднем энергия, равная $1/3 w \gamma_p$, где γ_p — плотность породы.

Фактически же расход энергии определяется величиной удельного расхода взрывчатого вещества, равного $k_{\text{вз}}$. Энергия этого количества взрывчатого вещества равна $k_{\text{вз}} U_1$.

На этом основании можно написать

$$\frac{1}{3} w \gamma_n = f_{\text{де}} k_{\text{вз}} U_1$$

где $f_{\text{де}}$ — соответствующий коэффициент полезного действия взрыва.

Приведенная формула справедлива при расчете взрыва небольшого масштаба, когда удельный расход ВВ практически не зависит от w , что соответствует формуле М.М. Боргскова.

Если же взрыв осуществляется в более крупном масштабе, то на основании выведенной выше закономерности масса заряда увеличивается быстрее, чем объем породы, выбрасываемой взрывом. Рассмотрим эту задачу подробнее.

Масса сопредоточенного заряда определяется из формулы, приведенной выше, и равна

$$q = k_{\text{вз}} w^2 \left(\frac{1+n^2}{2} \right)^2$$

Объем породы, выбрасываемой взрывом такого заряда из конической воронки глубиной, равной примерно глубине заложения заряда w , и с радиусом R_w равен $1/3 \pi R_w^2 w$ или приближенно $R_w^2 w$.

Заменив $R_w = w^n$ (n — показатель выброса), получаем, что объем выброшенной породы равен $n^2 w^3$.

Дели массу заряда на этот объем, получаем значение удельного расхода с поправкой на глубину заложения заряда:

$$k_{\text{вз}}' = \frac{q}{n^2 w^3} = k_{\text{вз}} w^2 \left(\frac{1+n^2}{2n} \right)^2$$

При таких условиях можно написать

$$f_{\text{де}} = \frac{w \gamma_n}{3 k_{\text{вз}}' U_1}$$

или

$$f_{\text{де}} = \frac{w^2 \gamma_n}{3 k_{\text{вз}}} \left(\frac{2n}{1+n^2} \right)^2$$

Выше было указано, что $k_{\text{вз}}$ прямо пропорционален плотности породы. Поэтому величина $\frac{k_{\text{вз}}}{\gamma_n}$ может считаться постоянной величиной, равной примерно $\frac{1}{1500}$ для различных пород.

Величина U_1 для взрывчатых веществ средней мощности равна, как указывалось выше, 400 000 кг·м/кг.

При таких условиях

$$f_{\text{дл}} = \frac{w^2}{900} \left(\frac{2p}{1 + p^2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Ряд исследователей предлагали в этой области другие способы расчетов, дающие несколько иные результаты.

Приведенная формула, как и другие способы расчета, даваемые в общем виде и касающиеся действия взрыва на породы, не может считаться очень точной. Однако и она позволяет сделать важные выводы.

Во-первых, коэффициент полезного действия при взрыве на выброс при всех возможных на практике условиях существенно меньше единицы. Далее, если принять, что w имеет наибольшее из встречающихся сейчас на практике значений порядка 100 м и $p = 1,5$, что следует считать возможным на практике минимумом, то и тогда

$$f_{\text{дл}} \approx 0,01 \approx 1\%.$$

Во-вторых при увеличении глубины заложения заряда коэффициент полезного действия увеличивается. Следовательно, более крупные взрывы энергетически, а вследствие этого в ряде случаев и экономически выгоднее малых.

В-третьих, при увеличении показателя выброса p коэффициент полезного действия уменьшается. Например, если p возрастет с 1,5 до 3, то $f_{\text{дл}}$ уменьшается в 2,4 раза.

Совершенно так же, как и при расчете коэффициента полезного действия при дроблении породы взрывом, можно утверждать, что при анализе взрывов на выброс недостаточно эффективное использование энергии не может служить основанием для отрицательной оценки этого метода. Значительная простота решения задачи в целом, сочетание в одном процессе дробления и транспортирования породы делают взрыв уже сейчас сильным и надежным средством техники. Вместе с тем небольшой коэффициент полезного действия указывает на огромные резервы, которые еще имеются в этой области и пока остаются далеко не использованными.

Направленный выброс породы взрывом

При взрыве сосредоточенных и линейных зарядов, что рассмотрено выше, выбрасываемая порода распределяется симметрично по сторонам воронки или выемки, создаваемой взрывом. Такое распределение не всегда является целесообразным. Во многих случаях необходимо выбросить всю породу в каком-либо одном направлении.

Эта задача может быть решена различными способами, создающими *направленный выброс породы*, или, как иногда принято говорить, *направленное действие взрыва*.

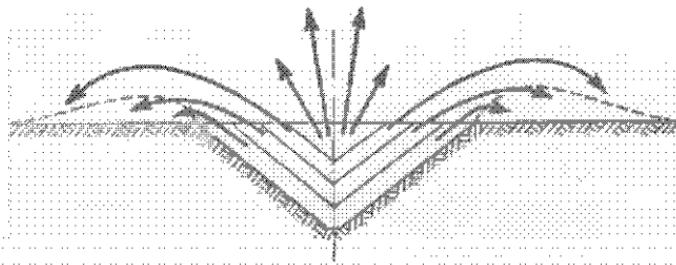
Исследованиями А.Н. Ромашева, В.Н. Родионова, Л.К. Белоухова и В.А. Виноградова установлено, что при выбросе из обычной воронки или выемки порода перемещается следующим образом.

Рассмотрим воронку или выемку в разрезе. В массиве выбрасываемой породы можно выделить ряд слоев, параллельных будущим откосам воронки. В верхней центральной части будущей воронки можно добавить небольшой конический объем, составляющий примерно 1–2% всего объема воронки. При взрыве отдельные слои породы, параллельные откосам, выбрасываются тем дальше, чем выше они расположены. Малый конический объем дробится на мелкие куски и распределяется более или менее равномерно по зоне выброса, а также частично попадает на дно образовавшейся воронки (рис. 48).

Чтобы нарушить симметрию выброса породы, необходимо облегчить движение грунта в заданную сторону. Это проще осуществить, если около будущей основной воронки или выемки произвести взрыв вспомогательного заряда, который создаст воронку или выемку, нижняя часть которой отстоит от основного заряда не дальше, чем край основной воронки. При таких условиях вся порода, находящаяся выше линии, соединяющей центры основной и вспомогательной воронок, будет выброшена при основном взрыве в сторону малой воронки, включая и навал породы от вспомогательного взрыва.

Таким образом, в сторону вспомогательной воронки переместится половина породы основной воронки и порода, расположенная между воронками выше линии, соединяющей их наиболее низкие точки (рис. 49).

Этот эффект направленного выброса еще более усилится, если обе воронки находятся на откосе, имеющем падение в сторону заданного направления выброса. В таких условиях целесообразно для получения лучшего эффекта выброса в заданном



Фиг. 56. Система шоковых волнистых волн, распространяющегося в море

направленных прижимать систему из трех (в том числе и самого центрального) зарядов, расположенных так, что каждый из них вынужден взаимодействовать по отдельности с следующим. При этом величина зарядов должна соответственно возрастать так же, как и глубина их заложения. Первым взрывается наименее мощный заряд, расположенный с той же стороны, куда намечен выброс. Чтобы обеспечить выброс в заданном направлении на достаточно большое расстояние, масса зарядов должна быть увеличена по сравнению с массой, полученной на основе обычного расчета.

Из общих закономерностей внешней баллистики следует, что дальность полета прямо пропорциональна квадрату начальной скорости. Поэтому уменьшение массы заряда, например, в 2 раза, приводящее к увеличению скорости движения горючей тяжелой в 2 раза, должно привести к увеличению дальности полета горючей в 4 раза. На основе этой закономерности можно выбирать массу зарядов при рассматриваемой системе направленного выброса горючей.

Ничто, жесткое должно пройти от момента взрыва единого заряда до момента взрыва другого, должно быть достаточным, чтобы волна могла полностью сформироваться. Подъем горючей должна отбросить горючую волной и требует времени, равного

$$t_1 = \sqrt{\frac{2w}{g}} = 0.45 \sqrt{w},$$

где w выражена в метрах ($g \approx 10 \text{ м/с}^2$).

Значение t_1 есть минимальное время замедления взрыва.

Направленный выброс осуществляют и иным способом, используя систему удлиненных зарядов по приложению

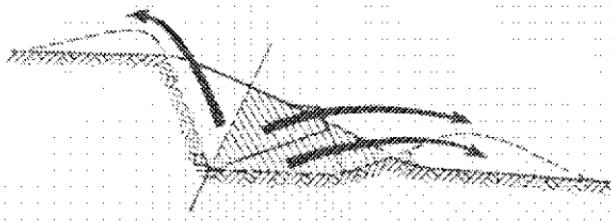


Рис. 49. Схема распределения выброшенной взрывом породы при наклонной свободной поверхности грунта

А.А. Черниговского. Если необходимо выбросить породу из выемки треугольного профиля только на одну сторону, то заряды распределяют в системе скважин, расположенных наклонно в плоскости откоса, противоположной той стороне, куда должна быть выброшена порода из выемки (рис. 50).

Общая масса взрывчатого вещества такая же, какая нужна при создании выемки обычным взрывом. Взрывчатое вещество должно быть распределено внутри скважин неравномерно. На единицу длины скважини должно приходиться мало заряда, прямо пропорционально глубине; внизу — в 2 раза пре-восходящая среднее значение; наверху — приближающаяся к нулю. Практически такую закономерность осуществить трудно. Поэтому можно заполнить взрывчатым веществом только две трети длины скважины.

Дальнейшее усиление направленности выброса породы можно получить при помощи соответствующего расположения системы зарядов в плане. Отдельные группы зарядов, производящих выброс породы, расположить в плане так, чтобы линии выброса пересекались как раз на таком расстоянии от зарядов, куда при данных условиях перемещается наибольшая часть всей выбрасываемой породы. Таким образом, можно по аналогии с оптикой получить своеобразное фокусирование потоком породы в заданном месте (рис. 51).

Подобный прием особенно хорошо удается, когда заряды направленного выброса располагаются на конусной откосе изгибающейся долины. Этот способ можно применить при создании к коммуникации взрыва низвергнутых, размываемых руслами, токушин в достаточно глубоких долинах. Ранний пример такого использования направленного взрыва — перекрытие в 1949 г. в акватории системы реки промышленного шахтного бур-

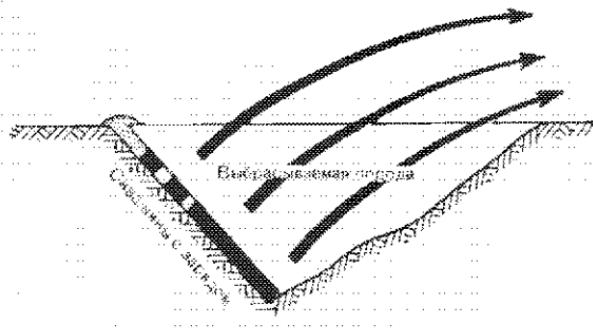


Рис. 50. Схема направленного выброса при помощи взрыва зарядов в наклонных шпурах

жарсай при паводке на реке Ангрене в Узбекистане. Это замечательное достижение во взрывном деле принадлежит взрывникам треста Узбеквзрывпром.

Направленный выброс по системе, предложенной А.А. Черниковским, тоже можно фокусировать, если расположить наклонные скважины с зарядами по полуцилиндрической поверхности так, что выпуклость этой поверхности обращена вглубь массива.

Эти примеры использования направленного выброса являются особыми случаями кумуляции, рассмотренной выше.

Взрывы всех таких зарядов необходимо осуществлять одновременно. Это требование является обязательным при применении системы скважин, расположенных по конусу. Любое замедление во времени недопустимо.

Ошибки во времени срабатывания детонаторов в отдельных зарядах не могут быть больше

$$\Delta t_{\text{кр}} \approx 0,1 \frac{w}{c},$$

где w — глубина заложения зарядов (глубина выемки); c — скорость распространения звука в породе.

Если учесть, что для скальных грунтов $c = 3000 \pm 5000$ м/с, то можно считать

$$\Delta t_{\text{кр}} \approx \frac{w}{30\ 000} \div \frac{w}{50\ 000}.$$

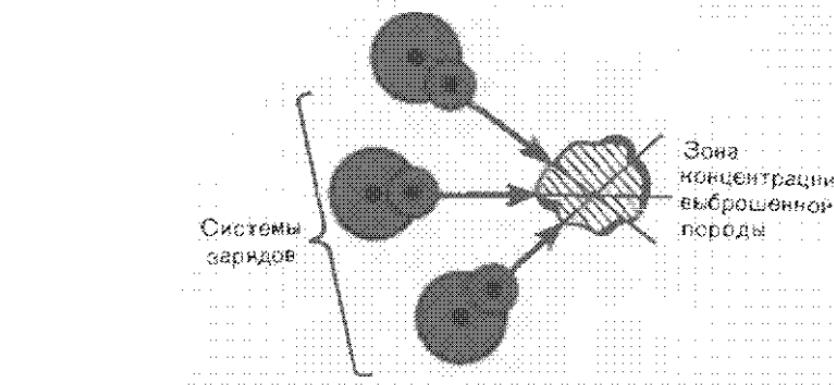


Рис. 51. Совместное действие трех систем зарядов с направленным выбросом породы

Если, например, $w = 40 \text{ м}$, $c = 4000 \text{ м/с}$, то

$$\Delta t_{\text{кр}} = 0,001 \text{ с} = 1 \text{ мс.}$$

Такому требованию еще могут удовлетворять хорошо проверенные электродетонаторы или детонаторы, инициируемые детонирующим шнуром. Однако при взрывах меньшего масштаба требуется уделять очень большое внимание для обеспечения одновременности взрыва всех зарядов.

Что касается систем последовательно взрываемых зарядов, то здесь точность не является обязательным условием.

При направленном выбросе породы существенное значение имеет сильный ветер.

Время, в течение которого выбрасываемая порода движется в воздухе, вполне достаточно, чтобы сильный ветер мог заметно сместить поток выброшенной породы.

Расчет показывает, что время, необходимое для вовлечения в движение ветром частицы породы диаметром D , равно примерно

$$t_{\text{в}} = 3000 \frac{D}{v_{\text{в}}}.$$

Например, при диаметре куска, равного 1 см (0,01 м), и при скорости ветра $v_{\text{в}} = 15 \text{ м/с}$ для увлечения ветром требуется 2 с.

Время нахождения породы в воздухе после ее выброса взрывом равно примерно

$$t_{\delta} = 0,9 \sqrt{H_{\delta}}.$$

где H_0 — высота подъема породы. При мощных взрывах высота нередко может достигать 100 м. В этом случае $t_0 = 9$ с. Если характерным размером частиц при этом является 1 см (0,01 м), то они будут лететь по ветру 7 с. За это время они будут перенесены на расстояние

$$S_0 = (t_0 - t_0) v_0,$$

или на 105 м, т.е. на расстояние, превышающее высоту их подъема.

Поэтому при взрывах на выброс необходимо учитывать, где целесообразно использовать действие ветра.

Помимо ветра при направленных взрывах на выброс может иметь существенное влияние сопротивление воздуха.

В этом отношении характерен следующий случай. В последнее время приобрело практический интерес строительство насыпных холмов в понижах рек, которые должны быть потом затоплены в результате строительства гидротехнических сооружений. Такие холмы при затоплении окружающей местности превращаются в искусственные острова, которые можно использовать для различных целей: установки буровых вышек, добычи нефти и газа, установки опор высоковольтных линий.

Идея устройства искусственного холма при помощи направленного выброса породы весьма проста. Взрывом необходимо обеспечить образование кольцевой выемки и выбросить к центру этого кольца как можно более значительную часть породы (удаляемой из выемки). Для этого можно применить способы направленного выброса породы, рассмотренные выше.

Однако при первых попытках осуществить на практике подобный направленный выброс оказалось, что к центру кольцевой выемки необращается меньше породы, чем следовало бы ожидать на основе опытов с прямолинейными выемками. Детальное исследование этого противоречия показало, что здесь отрицательную роль играет атмосферный воздух. При движении масс выброшенной породы к общему центру воздух сжимается и, не имея возможности быстро прорваться сквозь сходящиеся потоки раздробленной породы, интенсивно тормозит их движение. Далее этот воздух расширяется и порода разбрасывается в стороны, не достигая намеченного центра.

Чтобы преодолеть эту трудность, следует разделить круговую систему зарядов на четыре равные части, которые можно взрывать по отдельности. Сначала следует взорвать какие-либо две противоположные секции. В этом случае воздух сможет уходить

из центральной части коряча зарядов над сечениями, которые могут не взрываться. После образования назала породы, вызванного этим взрывом, следует произвести взрыв двух оставшихся сечений и завершить, таким образом, формирование искусственного холма.

Характерным примером массового направленного взрыва на выброс можно считать строительство взрывом первой очереди противоспутниковой глыбы в урочище Медео в районе города Алма-Аты, осуществленное в октябре 1966 г. Этот взрыв был выполнен по схеме, показанной на рис. 49. Вспомогательная воронка образовывается с помощью взрыва четырех зарядов общей массой около 1600 т. Основной заряд массой около 3700 т был взорван с замедлением в 3,6 с, когда уже успела синтезироваться вспомогательная воронка. Следует отметить, что действие взрыва основного заряда смысло миссии паропы практически в горизонтальном направлении, после чего взрывные газы вырвались в атмосферу наклонно вверх.

Когда давление в полости взрыва снизилось, верхняя часть откоса воронки обрушилась и закупорила полость, возникшую на месте расположения основного заряда. Этот заряд состоял из тротила. При его взрыве образовались газы, содержащие около 1000 г окиси углерода (угарный газ) и более 100 г гидро-кислоты. Такие газы очень опасны для людей, находящихся в зоне их возможного распространения. Однако при соприкосновении с атмосферным воздухом эти газы загорелись и их температура резко повысилась. В результате этого они расширились и стремительно поднялись вверх, ихрезав слой облаков и достигнув высоты около 8 км. Это обеспечило полную газовую безопасность даже на небольших расстояниях от места взрыва.

Интересной особенностью взрыва, созданной этим взрывом, было то, что начав массы радиоблочного гранита оказался необычайно плотным и прочным. Пористость составляла всего около 25%. Вследствие этого пластинка отличается весьма высокой стойкостью как при горячем сжатии (шоковом наложении), так и при возможных землетрясениях максимальной силы.

По определению правительственный комиссии, произошедший взрыв, а также по оценке президента Академии наук СССР академика М.В. Кендыши, взрыв в Медео является существенным достижением советской науки и не имеет себе равных в мировой практике взрывного дела.

Перекрытие направленным взрывом реки Вахш

В настоящее время можно считать, что наиболее ярким примером применения взрыва в гидротехническом строительстве является создание направленным взрывом плотины на реке Вахш в Таджикистане, осуществленное 29 марта 1968 года трестом Союзвзрывгпром под руководством С.А. Попова. Этот взрыв решил трудную задачу остановить с помощью плотины, созданной взрывом, сразу такую мощную реку, как Вахш, поднять уровень воды в реке примерно на 40 м и обеспечить на многие века надежную работу этого гидроузла. Гидроузел создан для отвода части воды из реки в туннель, построенный заранее в хребте Карагату на правом берегу реки. Туннель имеет длину 7,3 км и может пропускать до 100 м³/с воды в соседние долины — Яванскую и Обикийскую для орошения посевов и обеспечения водой промышленности. На левом берегу до взрыва был создан водоотводный канал для пропуска оставльной воды реки вниз по течению. На канале, как раз около места взрыва, был построен железобетонный портал с затворами, регулирующими пропуск воды и ее уровень выше плотины.

Необходимо отметить, что река Вахш имеет весьма значительную мощность. По энергии падения воды она превосходит в 3 раза такую могучую реку, как Енисей. Перекрыть такую реку и немедленно после этого удержать ее напор при подъеме уровня на 40 м возможно было только с помощью хорошо рассчитанного направленного взрыва. Необходимо при этом напомнить, что еще в 1929 году в США была попытка перекрыть существенно меньшую реку взрывом. Этот взрыв был, однако, проведен без всякого теоретического обоснования и окончился неудачей — река перелилась через плотину и снесла ее, не оставив никакого следа. С тех пор в капиталистических странах совершенно отказались от такого рода работ.

Кроме этих трудностей, взрыв на реке Вахш усложнялся необходимостью сохранить при взрыве водоспускной канал с бетонными береговыми стенками, портал гидротехнических затворов и туннель, находившиеся в непосредственной близости от места взрыва.

Взрыв был подготовлен путем заложения в крутом откосе склон правого берега системы из 13 зарядов, расположенных в зарядных камерах внутри горного массива. Заряды взорвались не одновременно, а с соответствующим замедлением. Сначала были взорваны средние четыре заряда переднего ряда. После этого были взорваны два наиболее крупных заряда заднего ряда.

После этого последовательно взрывались боковые заряды, сначала более близкие к средней части взываемого массива, а в последнюю очередь — крайние заряды. Таким путем было обеспечено наиболее целесообразное смещение породы в сторону русла реки и рассредоточено во времени сопряжение породы, окружающей туннель и основания канала и портала гидротехнических затворов.

Порода, образующая правый берег, состояла из пластов известняка, наклонных под углом 70° к горизонту. Высота хребта над уровнем реки равнялась примерно 370 м.

При таких условиях откос хребта, подрезанный воронками, возникшими при взрыве, и испытавший сильное сотрясение, должен был рухнуть в реку со значительной силой. Таким путем оказалось возможным увеличить объем породы, перемещенной в тело плотины, и обеспечить сильное сжатие упавших осколков породы при сравнительно небольшой общей массе зарядов (около 2000 т). В результате туннель и водосбросный канал остались при взрыве совершенно неповрежденными. Массив плотины высотой около 60 м и длиной (по линии реки) около 0,5 км оказался весьма прочным в механическом и гидравлическом отношении. Это можно пояснить следующими простыми расчетами.

Порода, перемещавшаяся взрывом (в данном случае известняк), имела временное сопротивление на раздавливание около 200 кгс/см^2 , или 2000 тс/м^2 . Чтобы уплотнить 1 м^3 породы с полной ликвидацией пористости, необходимо сжать его примерно на 0,4 м силой, возрастающей от нуля до 2000 тс.

Можно считать, что среднее значение силы составляет 1000 тс. Работа этой силы на пути в 0,4 м составляет 400 тс·м. Плотность породы можно считать приближенно равной $2,5 \text{ т/м}^3$. Следовательно, чтобы получить при падении породы в тело плотины ее полное уплотнение, необходимо, чтобы центр тяжести перемещенного массива породы опустился с высоты

$$\frac{400}{2,5} = 160 \text{ м.}$$

Это примерно соответствует тем условиям, которые были обеспечены при взрыве на реке Вахше.

Чтобы уменьшить помехи со стороны воды (глубина реки в период взрыва около 20 м), Вахш был перекрыт выше по течению, там, где происходило строительство известной Нурекской гидростанции. Такое перекрытие удалось осуществить только

на малое время. Однако уровень воды в реке в месте взрыва все же заметно снизился.

Помимо изложенных расчетов были и другие данные о том, что мощную реку можно остановить взрывом. Известно, что в 1911 году на Памире во время сильного землетрясения рухнула гора и преградила течение реки Мургаба. В результате этого образовалось огромное Сарезское озеро. Уровень воды был поднят на 500 м и обрушенный массив породы до наших дней, т.е. уже более 60 лет, устойчиво противостоит напору воды. Известны и другие примеры этого рода. Несмотря, однако, на все сказанное, взрыв на реке Вахше вызвал много споров и резких возражений. То, что он привел к прекрасному практическому результату, явилось таким образом очень важным этапом в изучении и обосновании возможностей использования взрыва в гидротехническом строительстве. Действительно, оказалось, что фильтрация через плотину совершенно ничтожна и затухает с течением времени. Кроме этого, применение направленного взрыва общей стоимостью в 950 тыс. руб. (из которых примерно половина стоимости взрывчатого вещества и четверть стоимости строительства камер для размещения заряда) дало возможность сэкономить на всем строительстве около 37 млн. руб. Можно, впрочем, думать, что здесь дело не только в этой экономии, а прежде всего в том, что без применения направленного взрыва вообще создание этого гидротехнического узла оказалось бы нереальным делом. Кроме того, взрыв позволил необычайно ускорить строительство. Узел был введен в строй на 2 года раньше планового срока. Это позволило развеять сомнение Иванской долины в течение двух дополнительных сельскохозяйственных сезонов. Эти сезоны оказались настолько удачными, что Таджикская республика получила прибыль свыше 100 млн. руб. (при годовом бюджете всей республики 660 млн. руб.). На подготовку и проведение взрыва затрачено 6 месяцев, за которые отработано примерно 8000 чел.-смен и обеспечен средний заработок около 200 руб. в месяц.

Можно отметить еще одну деталь, характеризующую взрыв на реке Вахше. При этом взрыве необходимо было раздробить массив хребта от его основания до трещин, чтобы обеспечить обрушение достаточного объема породы в русло реки. Вместе с тем нельзя было допустить интенсивного метания кусков породы, чтобы не повредить водоспускные сооружения. Это было достигнуто следующим образом. В штолнях, ведущих во взрывные камеры, была сделана только небольшая забойка выработанной породой. Вследствие этого взрывные газы после

взрыва сравнительно быстро вырвались наружу. Взрыв успел произвести нужное дробление породы, но его метательное действие было соответствующим образом снижено. Таким образом было найдено и применено еще одно средство управления созидающим взрывом.

Все сказанное позволяет считать, что перекрытие реки Вахша взрывом является таким примером практического применения направленного взрыва на строительстве, который особенно убедительно подтверждает мировое первенство Советского Союза во взрывном деле и заслуживает всемерного учета и использования как в Советской стране, так и во всем мире на благо всему трудящемуся человечеству.

Физика взрыва на сброс

Обрушение горного откоса взрывом, проведенным около основания этого откоса, принято называть взрывом на сброс. В этом случае действие взрыва освобождает энергию силы тяжести. При этом, чем больше высота откоса, чем круче откос и чем мощнее взрыв, тем более значительную долю в общей энергии обрушения составляет энергия силы тяжести. Как было выведено выше, энергия взрыва должна быть пропорциональна линии наименьшего сопротивления в степени 3,5. Если взрыв перемещает породу в горизонтальном направлении и сила тяжести не препятствует этому перемещению, то энергия взрыва пропорциональна линии наименьшего сопротивления в 3-й степени. Энергия силы тяжести зависит от масштаба обрушающегося массива иначе. Во-первых, эта энергия пропорциональна весу падающей породы. Этот вес пропорционален объему породы или линейным размерам в 3-й степени, в частности высоте обрушающегося массива в 3-й степени. Во-вторых, энергия силы тяжести, действующая при обрушении, пропорциональна высоте, с которой опускается центр тяжести массива породы при ее обрушении. Эта высота, очевидно, пропорциональна линейным размерам массива. Таким образом, энергия силы тяжести пропорциональна объему породы, умноженному на высоту падения. Это значит, что энергия силы тяжести растет пропорционально 4-й степени линейных размеров обрушающегося взрывом массива. Если взять отношение энергии силы тяжести к энергии взрыва, то окажется, что это отношение будет пропорционально линейным размерам массива (если энергия взрыва пропорциональна линии наименьшего сопротивления в 3-й степени).

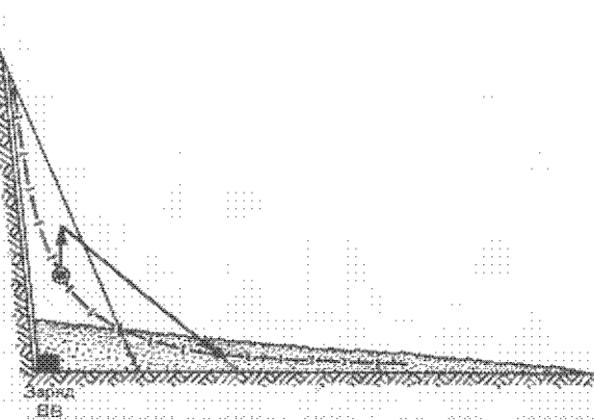


Рис. 52. Схема расположения заряда направления действия и откоса для осуществления взрыва из сброса

Поясним этот вывод примером. Пусть производится обрушение, при котором удельный расход взрывчатого вещества составляет $2 \text{ кг}/\text{м}^3$ породы. Это значит, что на каждый кубический метр породы затрачивается всего $2 \cdot 400\,000 = 800\,000 \text{ кг}\cdot\text{м}$ энергии. Здесь $400\,000 \text{ кг}\cdot\text{м}$ — удельная энергия взрывчатого вещества нормальной мощности. Примем далее, что центр тяжести обрушающейся породы смещается на 100 м. Допустим, что плотность породы равна $3000 \text{ кг}/\text{м}^3$. Тогда энергия обрушения под действием тяжести 1 м^3 породы будет равна

$$3000 \times 100 = 300\,000 \text{ кг}\cdot\text{м}.$$

При этих условиях отношение энергии силы тяжести к энергии взрыва равно

$$\frac{300\,000}{800\,000} = 0,375.$$

Если же высота обрушения равна (при прочих неизменных условиях) 1 км, то энергия силы тяжести возрастает в десять раз по сравнению с рассмотренным примером и соответствующее отношение станет равным

$$\frac{3000\,000}{800\,000} = 3,75.$$

Таким образом, в случае очень крупных взрывов на сброс взрывчатое вещество можно рассматривать как своеобразный вспомогательный детонатор, освобождающий накопленную в горном массиве гигантскую потенциальную энергию силы тяжести.

На графике можно изобразить обрушение откоса следующим образом. Можно допустить, что откос ограничен наклонной линией и примыкает к горизонтальной площадке. При взрыве сбрасывается часть породы и возникает новый откос, еще более крутой, обозначенный двойной линией на рис. 52. Обрушенная порода имеет в своем сечении форму треугольника, захватывающего своим основанием некоторую часть горизонтальной площадки. Как показывает расчет, центр тяжести породы при образовании навала перемещается по ветви гиперболы, проходящей через центр тяжести обрушающегося массива до его обрушения и имеющей asymptотами линию откоса, возникшую после обрушения, и линию горизонтальной площадки.

Чтобы найти положение центра тяжести породы после обрушения, необходимо произвести следующее геометрическое построение. Сначала можно представить себе, что взрыв приподнял разрушающую породу на высоту

$$H = \frac{\eta q_1 U_1}{\gamma},$$

где η — коэффициент полезного действия взрыва, который при крупных взрывах (масса заряда около 1000 т и более) в скале можно принять равным 1/3; q_1 — удельный расход взрывчатого вещества; U_1 — его удельная энергия; γ — плотность породы.

После такого подъема порода обрушается в сторону свободной площадки. При этом можно считать, что центр тяжести движется наклонно вниз по линии, образующей с горизонтом угол φ . Этот угол φ является углом внутреннего трения и углом естественного откоса разрушенной породы. Обычно можно считать, что $\varphi = 35^\circ$. Там, где построенная таким способом наклонная прямая пересечет ветви гиперболы, должен располагаться центр массы навала породы. Около этого центра можно построить треугольное сечение навала.

Длина основания навала будет в 3 раза больше расстояния центра массы навала от линии откоса, отмеченной двойной чертой. Высота навала около этой черты будет в 3 раза больше высоты

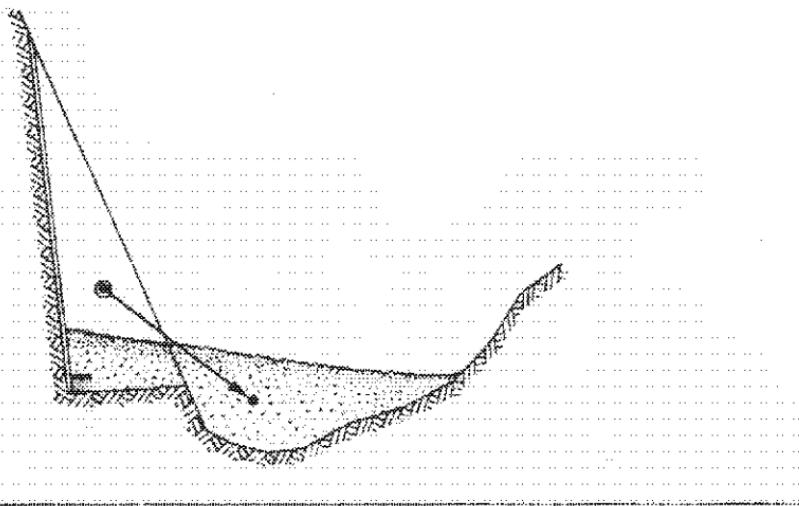


Рис. 53. Схема движения породы при взрыве на сброс

центра массы над линией горизонтальной площадки. Если при взрыве порода разрыхляется, то высоту навала надо еще умножить на коэффициент разрыхления, указывающий, во сколько раз растет объем при разрыхлении породы взрывом. Обычно при крупных взрывах можно этот коэффициент считать равным 1,2–1,3.

Если порода обрушается на криволинейный профиль поверхности, то, как правило, ложится, сглаживая неровности этого профиля. Это показано схематически на рис. 53.

Сейсмическое действие взрыва на выброс

При взрывах на выброс могут применяться особенно крупные заряды или системы зарядов. Некоторая часть энергии взрыва таких зарядов передается взрывной волне, распространяющейся на значительные расстояния от места взрыва, и может повредить здания и различные инженерные сооружения. Действие такой волны имеет сходство с действием сейсмических волн, возникающих при землетрясениях.

Поэтому явления, обусловленные взрывной волной, обычно называют *сейсмическим действием взрыва*.

Для практики важно, в каких случаях сейсмический эффект может быть наиболее опасным. Это зависит в первую очередь от того, в какой породе взрыв происходит, через какие породы распространяется взрывная волна и на каком грунте стоит здания или сооружения, на которые может подействовать сейсмический эффект взрыва. Взрывные волны лучше всего распространяются в породах, которые мало сжимаемы, не меняют своей структуры при прохождении взрывной волны и вместе с тем довольно подвижны.

К этим породам в первую очередь относятся водонасыщенные слабые грунты — торф, рыхлый песок, ил, неплотные суглинки и глины.

Эти грунты значительно изменяют свои сейсмические свойства при снижении в них содержания воды. Даже небольшое количество пузырьков воздуха, выделившихся внутри грунтовой воды, может сильно снизить интенсивность взрывной волны. При прохождении волны эти пузырьки сжимаются и поглощают при этом заметную часть ее энергии.

Еще сильнее снижается эффект при осушении таких грунтов. Вместе с этим снижается и эффективность взрыва на выброс и соответственно возрастает удельный расход взрывчатого вещества.

Невелик сейсмический эффект также в прочных скальных породах, где действие взрывной волны снижается малой деформируемостью среды.

Если же водонасыщенные слабые породы покоятся на жесткой скале, находящейся сравнительно неглубоко, то сейсмическое действие может заметно возрасти вследствие действия волн, отраженных от скального основания.

Все сказанное позволяет считать, что определяющими в сейсмическом действии взрыва являются микрогеологические условия на месте взрыва.

Теоретический анализ позволяет считать, что опасные в сейсмическом отношении зоны при взрывах на выброс ограничены радиусами, пропорциональными глубине заложения заряда. В самом первом приближении радиус сейсмически опасной зоны при взрывах на выброс можно считать равным

$$R_c = \left(\frac{10000}{7} \right)^2 w.$$

Расчеты, проводимые по такой формуле, показывают, что сейсмически опасная зона не выходит за пределы: в призмы выброса в породах, плотность которых превышает 2000 — 2500 кг/м³. Для более легких пород, наоборот, R_c может

быть заметно больше радиуса воронки. В этих случаях есть необходимость его определять при наличии вблизи места взрыва тех или иных объектов, чувствительных к действию взрывной волны.

При мощных взрывах, когда масса заряда определяется сотнями или тысячами тонн, радиус сейсмически опасной зоны может быть определен приближенно на основе следующей формулы, основанной на экспериментах,

$$R_c = 116 q^{1/3},$$

где R_c выражено в метрах, а масса заряда q — в тоннах.

Последние две формулы довольно близки друг другу при расчетах взрывов крупных зарядов.

Величина смещения грунта при таких взрывах может быть определена по следующей формуле:

$$S_R = 3400 \frac{q^{3/4}}{R^2},$$

где S_R — смещение в сантиметрах; q — масса заряда в тоннах; R — расстояние от места взрыва в метрах.

Чтобы воспользоваться этой формулой для сравнения действия взрыва с Природными землетрясениями, можно исходить из всесоюзного стандарта, согласно которому сила землетрясений связана со смещением (табл. 2).

Таблица 2

Балл	Название землетрясения	S_R , см
1	Незаметное	—
2	Очень слабое	—
3	Слабое	—
4	Умеренное	$<0,05$
5	Довольно сильное	0,05—0,1
6	Сильное	0,11—0,2
7	Очень сильное	0,21—0,4
8	Разрушительное	0,41—0,8
9	Опустошающее	0,81—1,6
10	Уничтожающее	1,61—3,2
11	Катастрофа	$>3,2$
12	Сильная катастрофа	?

Впрочем, нужно иметь в виду, что при взрывах получаются только отдельные интенсивные импульсы, а не возникает более или менее длительных колебаний различных периодов (частот). Вследствие этого при сейсмическом действии взрыва на те или иные сооружения, как правило, не возникают резонансные колебания, при которых деформации сооружений сильно растут и разрушения существенно усиливаются. Между тем при естественных землетрясениях такие явления наступают довольно часто.

Ускорение a , получаемое при сейсмических колебаниях, зависит, как известно, не только от смещения S_R , но и от периода колебаний T того объекта или сооружения, которое вовлекается в колебательное движение. Именно из теории колебаний следует:

$$a = S_R \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2$$

В качестве примера можно принять, что для многих зданий и других объектов (мосты, плотины и т.п.) период собственных колебаний имеет порядок величины в несколько десятых секунды. Если допустить, что

$$T \approx 0,5 \text{ с.}$$

то

$$a \approx 630 S_R.$$

Чтобы оценить a в наглядной мере, его можно сравнять с ускорением свободного падения тела $g = 981 \text{ см/с}^2$:

$$l = \frac{a}{g} \approx 0,64 S_R.$$

Исходя из величин, приведенных в табл. 2, можно получить следующие значения:

Балл земле- тресения	4	5	6	7
a	$< 0,032$	$0,032-0,064$	$0,067-0,134$	$0,138-0,276$
Балл земле- тресения	8	9	10	11
a	$0,276-0,536$	$0,54-1,7$	$1,76-3,4$	$> 3,4$

Разрушения при землетрясениях становятся уничтожающими, когда ускорение от сейсмических волн приближается к ускорению силы тяжести и переходит через этот предел.

Если взрыв происходит внутри массива скальной породы, то этот взрыв вызывает более или менее сильное растрескивание этой породы.

При средней прочности скалы взрывные газы могут прорвать-ся через трещины, если толщина массива

$$R_a = 11 q^{\frac{1}{3}}.$$

Разрушение скальной горной породы вблизи горизонтальной поверхности может распространяться на расстояние до

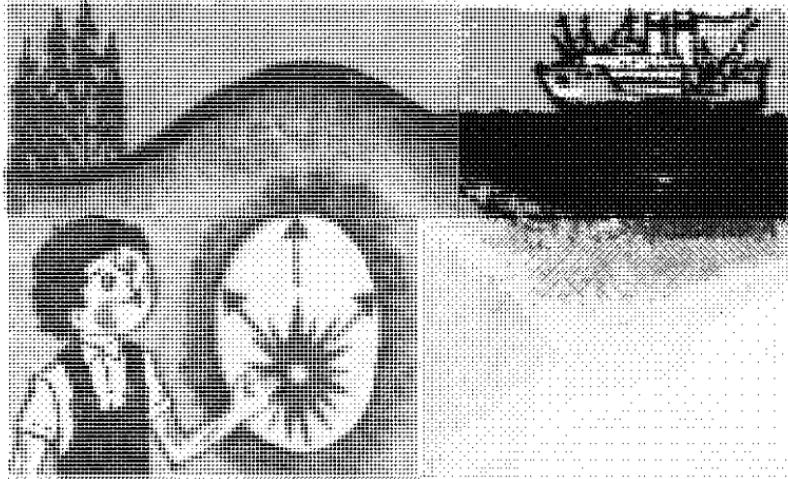
$$R_b = (22 \div 26) q^{\frac{1}{3}}.$$

Вблизи откоса, имеющего наклон к горизонту $20^\circ \div 30^\circ$ или еще больше, растрескивание скалы может распространяться на расстояние до

$$R_c = (33 \div 40) q^{\frac{1}{3}}.$$

Во всех приведенных формулах расстояния измерены в метрах и масса зарядов в тоннах.

Если сейсмическое действие взрыва оказывается чрезмерно большим, его можно уменьшить, разделив заряд на несколько частей и взрывая их через небольшие промежутки времени, т.е. применяя рассмотренное выше короткозамедленное взрывание.



Интересной областью применения массовых взрывов для возведения различных плотин и дамб является разработанная в организации "Союззарыбгром" лауреатом Государственной премии СССР А.Ф. Авдеевым и его сотрудниками идея применения камуфлированных взрывов. При таких взрывах сила взрыва не выбрасывает грунт в атмосферу и взрывные газы не вырываются наружу. Внутри грунта возникает замкнутая полость, заполненная взрывными газами. Вытесненный из полости грунт образует на поверхности довольно значительное выпучивание грунта, которое может быть использовано как плотина, дамба, транспортная насыпь.

Однако полость, образовавшаяся при взрыве внутри грунта, обычно оказывается неустойчивой. Ее свод обрушивается и полость заполняется разрыхленной породой. Это вызывает соответствующую осадку свободной поверхности и уменьшает величину полученного выпучивания. Несмотря на это отрицательное обстоятельство, не исключено использование взрыва, дающего рассмотренный эффект для

СТРОИТЕЛЬСТВО ПЛОТИН КАМУФЛЕТНЫМ ВЗРЫВОМ

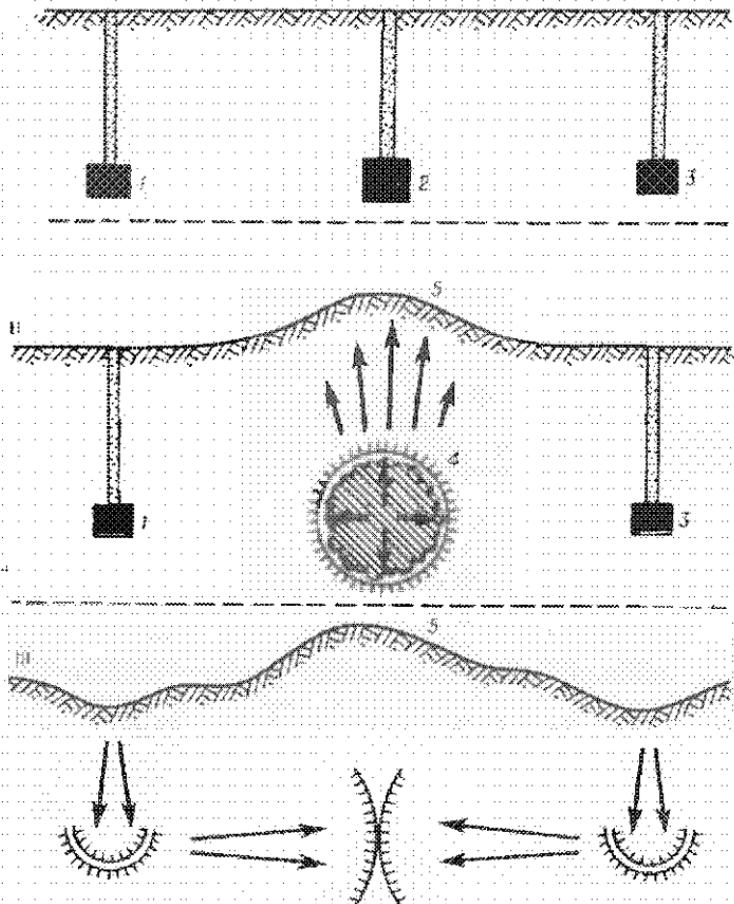


Рис. 54. Создание плотины камуфляжным взрывом:

I — до взрыва; II — взорван заряд; III — взорваны заряды 1 и 3 (стрелки показывают смещение грунта); 1, 3 — боковые заряды; 2 — основной заряд; 4 — полость, образовавшаяся при взрыве заряда 2; 5 — выпучивание грунта

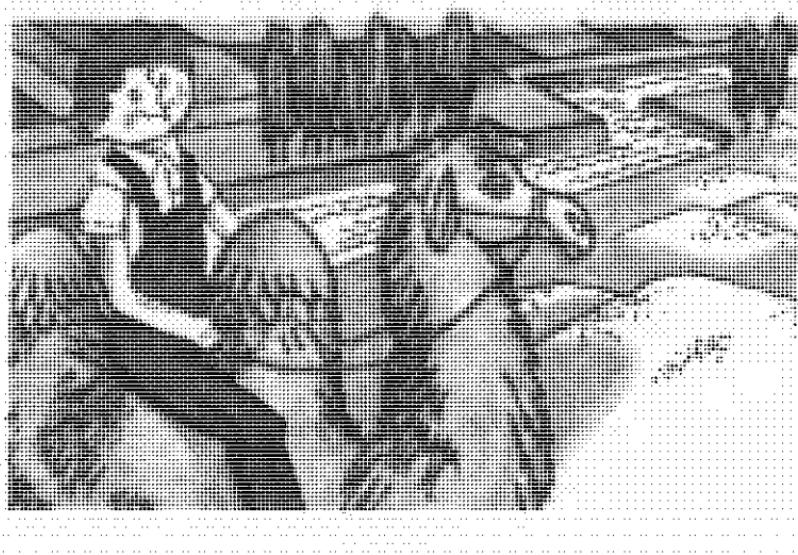
решения многих интересных и перспективных задач (рис. 54).

Можно считать, что метод выпучивания грунта при взрыве имеет перспективы дальнейшего развития. В частности, можно вокруг основного заряда, создающего основное выпучивание, расположить систему вспомогательных зарядов, расположенных

по сторонам. Если после основного взрыва будут взорваны эти вспомогательные заряды, то они смогут заполнить основную полость грунтом, смещаемым сбоку, и не позволят обрушиться своду осиевой полости, а следовательно, не дадут возникнуть осадке образовавшегося выпучивания. Конечно, над местами взрыва вспомогательных зарядов возникнет своя локальная осадка поверхности грунта. Однако при соответствующем учете этого явления эта осадка может не повлиять на центральную зону выпучивания.

Можно полагать, что многие задачи геотехнического строительства (гидротехника, ирригация, транспорт и т.д.) могут быть успешно решены, если путем мощных взрывов подготовить заранее зону работ путем изменения рельефа местности.

Например, можно рассмотреть такую задачу. Необходимо создать дамбу в морском заливе для защиты какого-либо города от наводнений или для создания приливной гидроэлектростанции. Решение такой задачи можно разбить на два этапа. Первый этап должен состоять в том, чтобы путем выпучивания при камуфлетных массовых взрывах создать систему островов в зоне строительства. Второй этап сводится при этом к тому, чтобы в проливах между этими островами возвести шлюзы, водопропускные сооружения, гидростанции и насосные станции. Есть основание считать, что такой путь может привести к заметному повышению качества и эффективности капитального строительства в Советской стране и взаимодействующих с нами социалистических и развивающихся странах.



Перемещение грунта при подземных камуфлетных взрывах может быть использовано также для создания выемок и каналов в грунте без выброса грунта. Это может быть выполнено, например, при следующих условиях. В грунте размещают три ряда зарядов, как показано на рис. 55. Сначала взрывают заряды внешних рядов. При этих взрывах происходит образование камуфлетных полостей и некоторое выпучивание грунта над местами взрыва боковых зарядов. Далее, пока еще полости, образовавшиеся при взрывах боковых зарядов, не замкнулись, взрывают средние заряды. При их взрывах основная часть грунта выпучивается в направлении боковых полостей и эти полости исчезают. Возможно также появление выпучивания над местом взрыва центральных зарядов. Однако это выпучивание должно быть незначительным потому, что при взрыве центральных зарядов значительная часть грунта смещается в направлении боковых, еще не разрушенных полостей. После этого происходит обрушение центральной полости и

СОЗДАНИЕ ВЫЕМОК И КАНАЛОВ КАМУФЛЕТНЫМ ВЗРЫВОМ

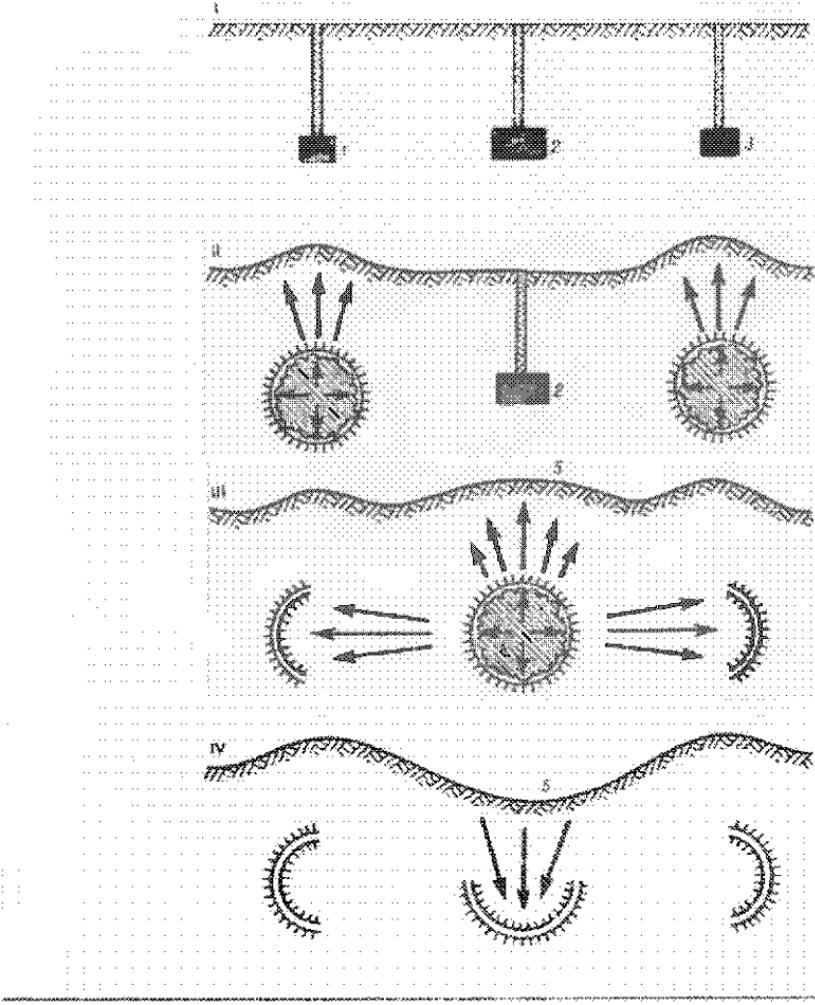
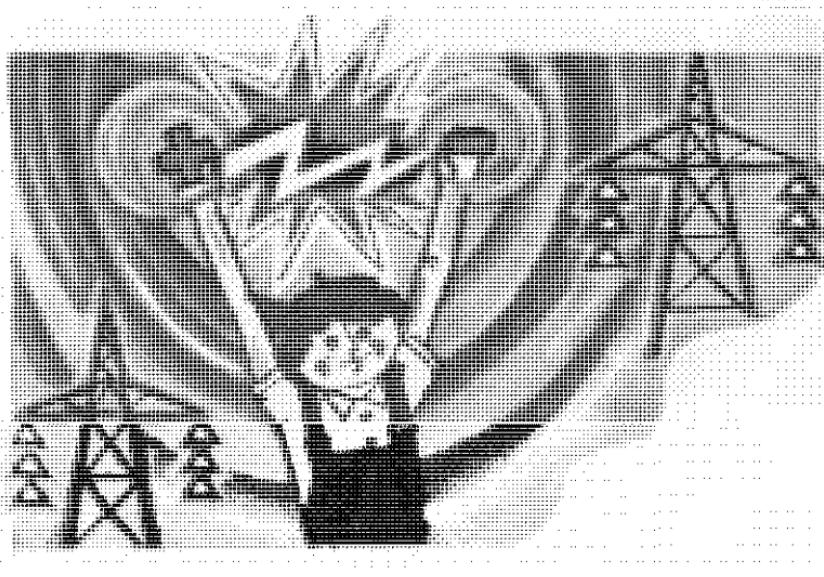


Рис. 55. Создание выемки хамуфлирующим взрывом:

1 — до взрыва; II — взорваны заряды 1 и 3; III — взорван заряд 2; IV — схема образования выемки за счет обрушения полости, созданной взрывом заряда 2; 1, 3 — боковые заряды; 2 — основной заряд; 4 — полость, образовавшаяся при взрыве заряда 2; 5 — выемка, образованная за счет обрушения полости, созданной взрывом заряда 2.

образование за счет этого обрушения выемки или канала, как это показано на рис. 55.

Создание плитин и каналов камуфлетными изысками экономически не всегда эффективно и поэтому не всегда может заменить обычные взрывные работы с выбросом грунта. Однако в некоторых случаях, когда выброс грунта взрывом затруднен, применение камуфлетных взрывов целесообразно. Это может произойти, например, тогда, когда создают плитины на участках закрытых слоем воды или углубляют камуфлетными взрывами фарватеры на мелководье.



Источник энергии взрыва в обычных условиях — такое вещество, в котором возможна реакция с весьма быстрым выделением значительной энергии, в результате чего обычно возникает большой объем распыленного газа. В качестве взрывчатого вещества могут быть применены соответствующие химические соединения или достаточно большие массы, в которых может развиваться ядерная реакция деления или синтеза атомных ядер.

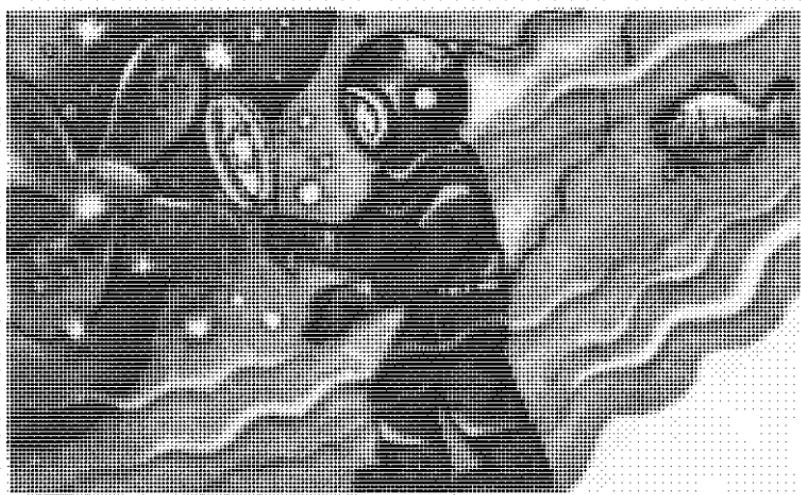
Во всех этих случаях запас энергии взрыва вносится в то место, где должен произойти взрыв заранее и потом энергия переводится из потенциальной формы в форму явную, связанную с высокой температурой и интенсивным движением продуктов взрыва.

Однако взрыв можно осуществить и иным путем. Необходимую энергию можно заранее накопить, заряжая до высокого потенциала электрический конденсатор. Потом этот конденсатор можно разрядить через небольшую проволочку, которая при нагревании мощным электрическим током почти мгновенно нагре-

ВЗРЫВ
БЕЗ ВЗРЫВ-
ЧАТОГО
ВЕЩЕСТВА —
ЭЛЕКТРИ-
ЧЕСКАЯ
ИСКРА

ется и испарится, что создает условия взрыва. Можно также разрядить конденсатор через воздух или иной диэлектрик, причем получится мощная искра, нечто вроде конденсированной молнии. При этом также возникнет облако раскаленного газа, которое, расширяясь, создает взрывную волну в окружающей среде.

Такие электрические взрывы в последние десятилетия приобрели широкое применение при электромагнитной обработке металлов, при дроблении кусков руды и для других целей.



Явления, свойственные взрыву, могут возникать без взрывчатых веществ и вообще без концентрированного источника энергии. Примером этому может служить *кавитация*, которая состоит в следующем. Часто встречаются случаи, когда в потоке воды (или иной жидкости) давление непостоянно. Тогда в моменты достаточно низкого давления в жидкости образуются мелкие пузырьки, заполненные паром этой жидкости. Жидкость при этом как бы вскипает. При последующем повышении давления пузырьки сжимаются и даже полностью исчезают, как говорят специалисты — пузырьки схлыпываются. При этом жидкость, скружающая пузырек, движется со всех сторон к центру этого пузырька и в момент его исчезновения резко тормозится. В этих условиях вблизи центра бывшего пузырька возникает в жидкости весьма высокое давление, такое, как если бы там произошел микроскопический взрыв весьма мощного взрывчатого вещества. Если такой режим колебаний давления возникает в потоке жидкости близи стенки, то пузырьки, возникаю-

ВЗРЫВ БЕЗ ВЗРЫВА — КАВИТАЦИЯ

ющие и исчезающие списанным путем, могут так интенсивно воз-
действовать создаваемыми ими взрывными волнами на матери-
ал стенки, что самые прочные вещества, например легированная
сталь, интенсивно разрушаются. Это явление называется *кавита-
цией*. Оно представляет собой очень опасный разрушающий
фактор, которого следует всячески избегать при конструиро-
вании гидротурбин, корабельных гребных винтов и других
объектов, соприкасающихся с потоками различных жидкостей.



Развитие космических полетов, достигнутое в последние десятилетия в основном за счет достижений советских и американских ученых, находится в настоящее время в такой стадии, когда может быть поставлена задача о применении взрывов для проведения различных работ в космосе и на поверхности других планет. Использование энергии взрыва в космосе имеет то существенное преимущество по сравнению с другими видами механизации работ, что многие действия могут быть осуществлены с минимумом средств и при малой массе используемых устройств. Особенно перспективно применение в космосе взрыва для сварки металлических деталей — стержней и листов металла. Следует подчеркнуть, что в вакууме космического пространства избыточное давление взрывных волн обусловлено только действием взрывных газов. Давление окружающей среды равно нулю. В этих условиях избыточное давление взрывной волны, согласно формуле Садовского, равно

$$\Delta P_{\Phi} = 7 \frac{q}{R^3}.$$

ВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ В КОСМОСЕ И НА ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ

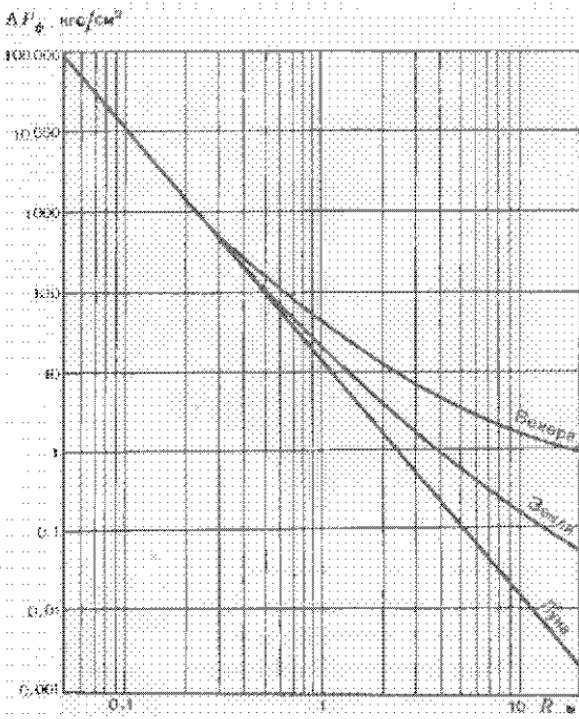
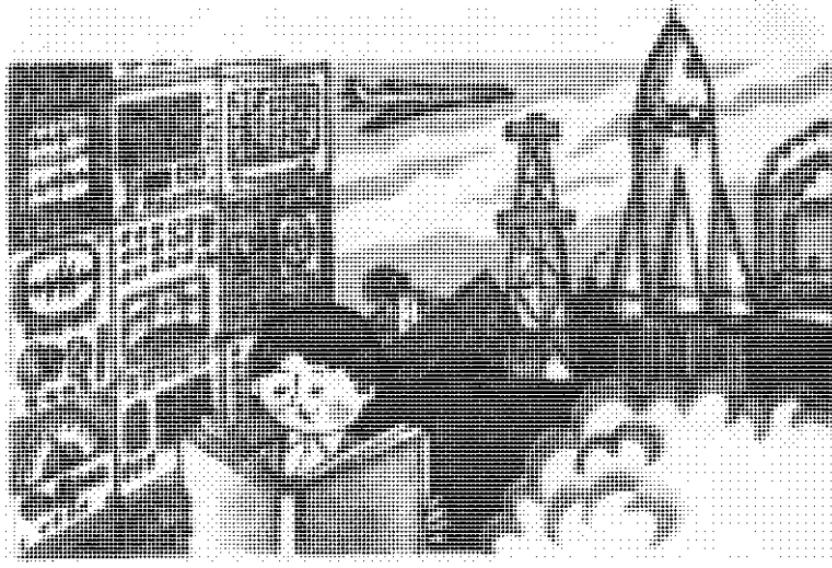


Рис. 56. Зависимость избыточного давления на фронте воздушной ударной волны ΔP_0 в зависимости от расстояния R для различных небесных тел; масса заряда $q = 1 \text{ кг}$

где избыточное давление, как обычно, выражено в килограммах на квадратный сантиметр, масса тротилового заряда q в килограммах и расстояние R — в метрах. Значение ΔP_0 , определяемое по приведенной формуле, значительно меньше, чем в воздухе, особенно при больших значениях R . Это делает применение взрыва в космосе значительно удобным и безопасным, чем на Земле (рис. 56).



Подводя итоги рассказу о том, что такое взрыв, можно сделать совершенно определенные выводы.

Взрывное дело существует многие столетия. При этом наряду с применением в военном деле взрыв уже давно применялся и в мирных целях — в горном и строительном деле. Однако до начала нашего века прогресс во взрывном деле был менее заметен, чем в других областях: в электротехнике, механике, термодинамике, физике и пр.

Это объясняется тем, что изучение взрыва связано с точным измерением очень высоких скоростей, гигантских давлений и необычайных концентраций энергии. Решать такие задачи наука научилась совсем недавно. Только после Великой Отечественной войны оказалось возможным подчинять стремительные процессы взрыва точному расчету и наметить определенные пути для решения труднейших и весьма ответственных технических задач.

В результате этого древний богатырь — взрыв — пережил новое, чудесное рождение.

ВТОРОЕ РОЖДЕНИЕ БОГАТЫРЯ

Сейчас взрывное дело имеет все предпосылки к тому, чтобы теоретической глубиной и практическим размахом догнать самые передовые области современных знаний, такие, как космонавтика, радиоэлектроника и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Научно-техническая

- Абдеев Ф.А., Барон В.П., Блейман И.Л.**
Производство массовых взрывов. М., Недра, 1977.
- Андреев К.К.**
Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., Госэнергоиздат, 1957.
- Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шентер Б.И.**
Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
- Боуден Ф., Иоффе А.**
Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидкых веществах. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
- Власов О.Е.**
Основы динамики взрыва. М., Изд. Военно-инженерной академии им. Куйбышева, 1956.
- Гурин А.А.**
Управление воздушными ударными волнами при взрывных работах. М., Недра, 1978.
- Докучаев М.М., Родионов В.Н., Ромашев А.Н.**
Взрыв на выброс. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Зельдович Я.Б., Компанец А.С.**
Теория детонации. М., Гостехиздат, 1955.
- Кольский Г.**
Волны напряжения в твердых телах. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
- Коул Р.**
Подводные взрывы. М., Изд-во иностр. лит., 1950.
- Лендау Л.Д., Пивни Е.М.**
Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1953.
- Лихов Г.М.**
Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. М., Недра, 1964.
- Марченко Л.Н.**
Увеличение эффективности взрывов при добывании полезных ископаемых. М., Наука, 1965.
- Мосинец В.Н.**
Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М., Недра, 1976.
- С.И. Нионтое, Д.Д. Протополов, И.Е. Сатников.**
Подземные ядерные взрывы. Атомиздат, 1966.
- Покровский Г.И., Федоров И.С.**
Действие удара и взрыва в деформируемых средах. М., Гостройиздат, 1957.
- Покровский Г.И., Лихов Г.М.**
Взрывные волны в грунтах. М., Гостретехиздат, 1962.
- Покровский Г.И., Черниговский А.А.**
Расчет зарядов при массовых взрывах на выброс. М., Гостретехиздат, 1962.
- Станюкович К.П.**
Неустановившиеся движения сплошной среды. М., Гостретехиздат, 1955.

Седов В.И.

Методы подобия и размерности в механике. М., Гостехиздат, 1957.

Ханукава А.Н.

Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. М., Госгортехиздат, 1962.

Яковлев Ю.

Гидродинамика взрыва. М., Судпромиздат, 1961.

Учебная

Ассанов В.А.

Взрывные работы М., Углехимиздат, 1953.

Взрывные работы / П.И. Барон, Г.А. Васильев, М.М. Докучаев и др. М., Промстroiиздат, 1953.

Гейман Г.М.

Взрыв. М., Наука, 1978.

Научно-популярная

Докучаев М.

Левина, остановися! М., Советская Россия, 1965.

Кубалов Б.Г.

Пути развития взрывного дела в СССР. М., Стройиздат, 1948.

Покровский Г.И.

Взрыв и его применение. М., Воениздат, 1960.

Покровский Г.И.

Физика взрыва. М., Знание, 1954.

Покровский Г.И.

Весьма высокие давления в природе и технике. М., Знание, 1965.

Покровский Г.И.

Созидающий взрыв. М., Знание, 1962.

Диафильм

Мирный взрыв.

Подготовлено обществом "Знание" и студией "Диафильм", М., 1965.

СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ И ТЕРМИНОВ

Взрыв — это очень быстрое выделение большого количества энергии и большого объема газов (определение, данное М.В. Ломоносовым в 1748 году).

Взрыв может происходить при химической реакции с выделением энергии; при электрическом разряде; при действии луча света, идущего из квантового генератора, на некоторые материалы; при ядерных реакциях деления и синтеза (атомная и термоядерная энергия).

Взрыв на выброс породы — взрыв, вызывающий образование воронки и соответствующее перемещение определенного объема породы.

Взрывные газы — газы, образующиеся при взрыве (не смешиваясь со взрывчатыми газами, т.е. такими, которые являются газообразными взрывчатыми веществами).

Взрывчатые вещества (химические) — химические соединения, содержащие в себе запас потенциальной (скрытой) энергии способной выделиться (перейти в кинетическую форму) без участия в реакции какого-либо другого вещества. Выделение энергии возникает при ударе соответствующей силы или при нагревании. Взрывчатые вещества могут выделять энергию постепенно (горения) или весьма быстро (взрыв), в частности взрыв в результате детонации (см.).

Воздушная ударная волна — ударная волна, распространяющаяся в воздухе.

Волна детонации — см. детонационная волна.

Волна разрежения — волна, идущая через ту или иную среду и вызывающая уменьшение плотности и давления в этой среде.

Воронка (или горн по старой терминологии) — выемка в грунте, получаемая при взрыве сосредоточенного заряда.

Выброс — см. взрыв на выброс породы.

Гидродинамическая теория детонации — теория взрывоподобного (т.е. весьма быстрого) разложения химического взрывчатого вещества при прохождении через него мощной ударной (детонационной) волны.

Детонационная волна — достаточно мощная ударная волна, способная вызвать при прохождении через взрывчатое вещество взрывоподобное (т.е. очень быстрое) разложение этого вещества с выделением значительной энергии и большого объема газов.

Детонация — весьма быстрое разложение химического взрывчатого вещества при прохождении по этому веществу мощной ударной волны, которая в этом случае называется детонационной волной.

Зебойка — оболочка из инертного вещества, окружающая заряд взрывчатого вещества. Эта оболочка предназначена для того, чтобы несколько задержать расширение продуктов взрыва и таким образом способствовать полноте детонации.

- Закон состояния** — закон, определяющий зависимость объема (или плотности) того или иного вещества от давления, под которым оно находится, и температуры.
- Инициирование взрыва** — возбуждение взрывной реакции в заряде взрывчатого вещества, приводящее к очень быстрому выделению значительного количества энергии и значительного объема газов.
- Конденсированный электрический разряд** — мощный электрический разряд батареи высоковольтных конденсаторов, вызывающий взрывообразное нагревание и испарение тонкого проводника или пробой искрой диэлектрика (например, воздуха).
- Короткозамедленное взрывание** — взрывание группы зарядов, осуществляемое так, что взрывы происходят через относительно небольшие, заранее рассчитанные промежутки времени.
- Коэффициент полезного действия** при взрыве — число, указывающее, какая доля всей энергии взрыва затрачивается на определенный вид действия (например, на дробление породы, на выброс породы и так далее).
- Критический диаметр заряда** — минимальный диаметр удлиненного цилиндрического заряда, по которому еще может распространяться детонационная волна без затухания.
- Кумулятивная струя** — струя вещества, выброшенная взрывом в заданном направлении и имеющая весьма высокую скорость (5–10 км/с и более).
- Кусковатость** породы, разрушенной взрывом, — характеристика размеров, формы и количества кусков, на которые дробится порода под действием взрыва.
- Линейный заряд** — удлиненный заряд, длина которого превышает радиус действия взрыва (радиус воронки, радиус дробления породы).
- Линия наименьшего сопротивления (л.н.с.)** — кратчайшее расстояние от центра сосредоточенного заряда до свободной поверхности.
- Направленное действие взрыва** — распределение энергии взрыва по заданным направлениям, достигаемое при помощи различных средств — придания заряду определенной формы, выбора места инициирования взрыва, выбора места расположения зарядов в разрушающей среде и других средств.
- Направленный выброс породы взрывом** — такой выброс породы, при котором основная часть породы перемещается в заданную сторону и на заданное расстояние.
- Негабаритные куски породы** — чрезмерно крупные куски, получаемые при дроблении породы взрывом и требующие дополнительного разрушения.
- Показатель выброса** — отношение радиуса воронки, получаемой при взрыве, к глубине заведения заряда (линии наименьшего сопротивления).
- Разрушение (дробление) горной породы взрывом** — разрушение тех или иных пород взрывной волной и давлением взрывных газов.
- Сейсмическое действие взрыва** — сотрясение взрывом грунта, вызывающее повреждения зданий и других объектов.

Штампованием взрывом — штампованием изделий с помощью взрывных газов или жидкости, приведенной в движение взрывом обычного заряда химического взрывчатого вещества, или конденсированного электрического заряда.

Электроидинамическая аналогия — математически обоснованное сходство между линиями тока (направлениями движения среды) после взрыва и силовыми линиями электростатического (электрического) поля.

Система линейных зарядов — совокупность зарядов ВВ, закладываемых в параллельно пробуренные в городе скважины и взрываемых одновременно или через малые промежутки времени.

Ударная волна — волна, распространяющаяся в твердых, жидких и газообразных веществах, отличающаяся тем, что она вызывает скачкообразное (ударное) сжатие вещества.

Удельная энергия взрывчатого вещества — энергия, содержащаяся в скрытой (потенциальной) форме в единице веса (1 кг) взрывчатого вещества. Выражается в калориях на килограмм взрывчатого вещества.

Фронт ударной волны — передняя граница зоны сжатия, возникающей при прохождении ударной волны в том или ином веществе.

Чувствительность взрывчатых веществ — способность взрывчатого вещества взрываться при ударе или нагревании.

СОДЕРЖАНИЕ

5	К ЧИТАТЕЛЮ.
7	ПРЕДИСЛОВИЕ.
9	ЧТО ТАКОЕ ВЗРЫВ?
15	ДЕСЯТЬ ВЕКОВ В ГЛУБЬ ИСТОРИИ.
20	НА ПОДСТУПАХ К ТЕОНИИ.
38	ВЗРЫВ В ВОЗДУХЕ.
86	ГАШЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН ВАКУУМОМ.
88	ГАШЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН РАЗРУШАЕМЫМИ ПРЕГРАДАМИ.
90	ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ В КОСМОСЕ.
93	ВЗРЫВОМ ЗАМЕНЯЕТСЯ ШТАМП.
103	НЕЗАМЕНИМЫЙ ПОМОЩНИК СОРНЯКА.
133	ВЗРЫВ – СТРОИТЕЛЬ.
171	СТРОИТЕЛЬСТВО ПЛОТИН КАМУФЛЕТНЫМ ВЗРЫВОМ.
174	СОЗДАНИЕ ВЫЕМОК КАМУФЛЕТНЫМ ВЗРЫВОМ.
177	ВЗРЫВ БЕЗ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА – ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИСКРА.
179	ВЗРЫВ БЕЗ ВЗРЫВА – КАВИТАЦИЯ.
181	ВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ В КОСМОСЕ И НА ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ.
183	ВТОРОЕ РОЖДЕНИЕ БОГАТЫРЯ.
185	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.
187	СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ И ТЕРМИНОВ.

Георгий Иосифович Покровский

ВЗРЫВ

Редактор издательства Э. Н. Чернегова
Обложка художника В. Н. Конюхова
Художественный редактор О. Н. Зайцева
Технический редактор Л. С. Гладкова
Корректор А. П. Стальнова

ИБ № 3926

Сдано в набор 08.04.80
Подписано в печать 04.06.80
Г.17113
Формат 84×108 1/2
Бумага офсетная
Печать офсетная
Набор выполнен на машине типа ИБМ "Композер"
Усл. п. л. 10.08
Уч.-изд. л. 9.89
Тираж: 30 000 экз.
Заказ № 603.20375
Цена: 40 коп.

Издательство "Медиа", 103633,
Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 17/19

Ленинградская фабрика офсетной печати № 1
Ленинград, 197101, ул. Мира, 3.



NON-CHINESE

三月期，三月，1990年—1991年，1992年

王國強，男，1950年—1955年，1957年

王國強，男，1950年—1955年，1957年

१३५ अप्रैल १९४८ विद्युत विभाग विद्युत विभाग
१३६ अप्रैल १९४८ विद्युत विभाग विद्युत विभाग
१३७ अप्रैल १९४८ विद्युत विभाग विद्युत विभाग
१३८ अप्रैल १९४८ विद्युत विभाग विद्युत विभाग
१३९ अप्रैल १९४८ विद्युत विभाग विद्युत विभाग
१४० अप्रैल १९४८ विद्युत विभाग विद्युत विभाग
१४१ अप्रैल १९४८ विद्युत विभाग विद्युत विभाग

१०५ अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद
अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद अनुवाद

३३ देवदेव देवदेव देवदेव देवदेव
देवदेव देवदेव देवदेव देवदेव देवदेव
देवदेव देवदेव देवदेव देवदेव देवदेव
देवदेव देवदेव देवदेव देवदेव देवदेव