

Основы теории действия взрыва

Поле взрыва заряда ВВ

Продукты детонации (ПД) при своем расширении в среде, окружающей заряд, формируют ударную волну (УВ), параметры которой зависят от типа ВВ, его плотности и от сжимаемости среды

Для того, чтобы охарактеризовать действие взрыва на окружающие объекты, говорят о поле взрыва. Полем взрыва называется область пространства, в которой проявляется его разрушительное действие за счет расширяющихся ПД и возникает в среде УВ.

Форма поля взрыва в однородной среде зависит от формы заряда. Так, при взрыве сферического заряда, инициируемого из центра, облако ПД и УВ имеют форму сферы.

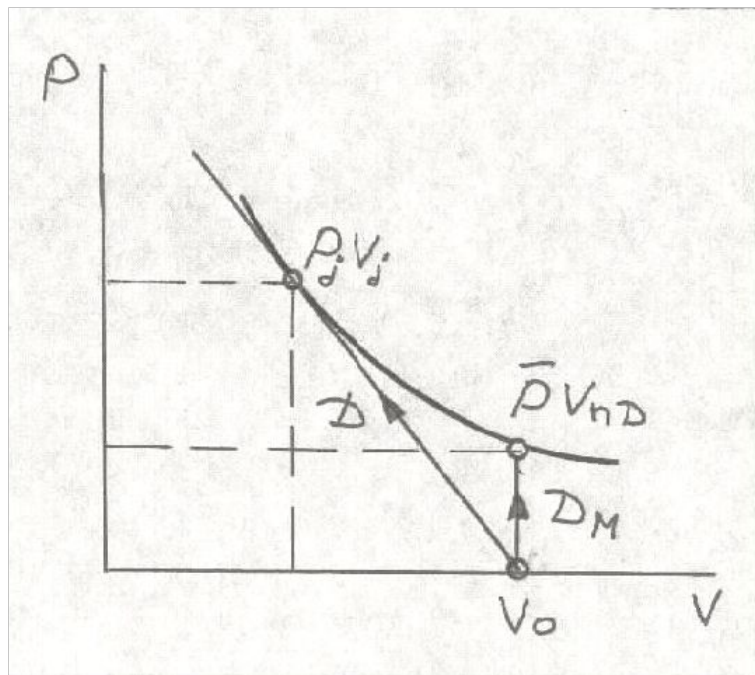


Рис. 13.1. P,V- диаграмма
“мгновенной” детонации

При взрыве цилиндрического заряда, если $l_{зар} \leq (2 \div 3) d_{зар}$, инициированного с торцов, в первоначальный момент форма поля взрыва близка к конической. С увеличением же расстояния от заряда форма его приближается к сферической.

При взрыве линейного цилиндрического заряда, когда $l_{зар} \gg d_{зар}$ форма поля взрыва в процессе распространения детонации имеет форму конуса, а по окончании - цилиндра. Неоднородность среды (наличие границ раздела) оказывает влияние на форму поля взрыва.

Для упрощения в дальнейшем будем рассматривать взрыв сферического заряда (R_0) в однородной среде. Предположим, что детонация проходит мгновенно $D_M = \infty$, тогда в первоначальный момент времени радиус оболочки ПД будет равен (R_0), а $V_{ПД} = V_0$ (рис. 13.1).

Найдем давление в облаке ПД ($\bar{P}$). Принимая уравнение в виде (5.1) с $k=3$, запишем

$$P_j V_j^3 = \bar{P} V_{\text{ПД}}^3 = \bar{P} V_0^3, \quad (13.1)$$

$$\bar{P} = P_j \left(\frac{V_j}{V_0} \right)^3, \text{ используя (9.9)}$$

$$\bar{P} = P_j \left(\frac{3}{4} \right)^3 = \frac{27}{64} P_j \approx 0.5 \cdot P_j. \quad (13.2)$$

По мере расширения ПД давление в них падает, по мере распространения УВ, а к центру облака движется волна разрежения (R) (рис. 13.2 б).

В зависимости от интенсивности действия ПД и УВ условно различают три зоны разрушительного действия взрыва.

Первая зона (рис. 13.2 б) - зона действия ПД или зона бризантного действия.

$$r_1 \leq (1.5 \div 2.0) r_0. \quad (13.3)$$

Вторая зона - зона совместного действия ПД и УВ.

$$r_2 \leq (5 \div 6) r_0 \text{ (рис. 13.2 в) . (13.4)}$$

Третья зона - зона общего (фугасного) действия взрыва

$$r_3 > (5 \div 6) r_0 \text{ (рис. 13.2 г) . (13.5)}$$

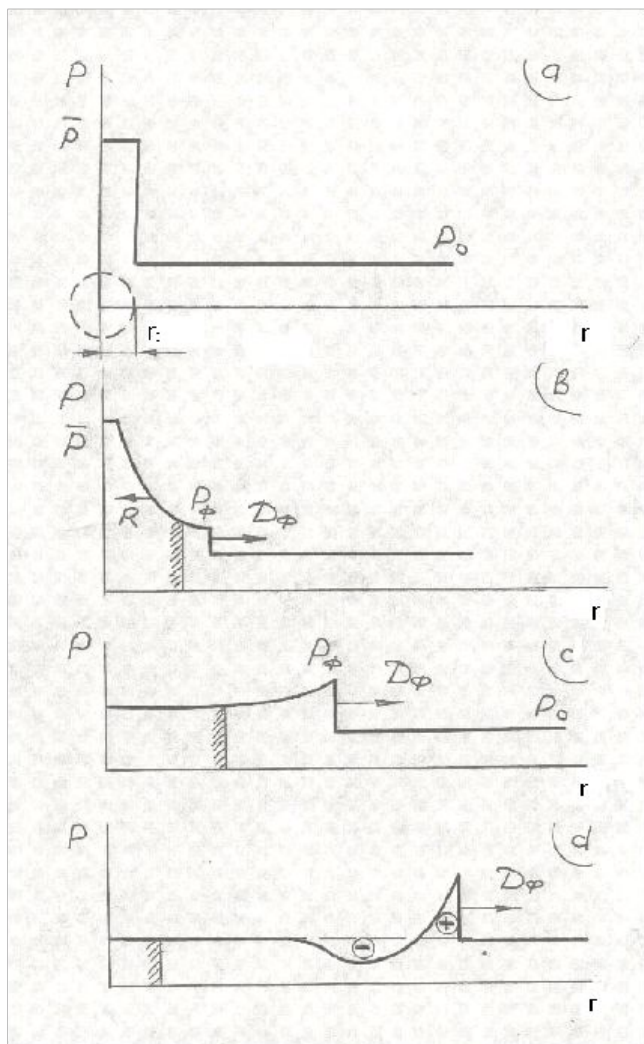


Рис. 13.2 Поле взрыва
сферического заряда в однородной
среде

Особенностью распространения ПД является то, что они не могут расширяться беспредельно. Процесс расширения заканчивается тогда, когда давление и плотность ПД и среды сравниваются.

Предельный радиус ПД ($R_{пр}$) при взрыве в воздухе, например, заряда ВВ с $\rho_0 = 1.6 \div 2.0 \text{ г/см}^3$ что в 1300-1600 раз превышает плотность воздуха

$$R_{пр} = \sqrt[3]{1300 \div 1600 \cdot R_0} = (11 \div 13) \cdot R_0. \quad (13.6)$$

ПД в начале “по инерции” должны занимать объем, превышающий предельный, затем испытывают обратное движение - сжатие, снова расширение выше предельного и т.д., т.е. происходит пульсация облака.

При переходе УВ из более плотной среды (ВВ) в менее плотную (см. раздел 7, п. 7.8.2) скорость границы раздела

$$U_x = U_j + \Delta U = U_j + \int_{P_x}^{P_j} \frac{\partial P}{\rho c}, \quad (13.7)$$

где P_x - конечное давление при расширении.

Используя выражения (4.1), (8.9), (8.12), получим:

$$U_x = \frac{D}{k+1} \left\{ 1 + \frac{2k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_x}{P_j} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \right\} . \quad (13.8)$$

Предельный случай - истечение в вакуум при $P_x=0$

$$U_x = U_{\max} = \frac{3k-1}{k^2-1} D , \quad (13.9)$$

при $k=3$ получим $U_{\max}=D$.

В действительности $U_{\max} \geq 2D$ поскольку величина (k) не является постоянной в процессе расширения ПД.

Расчет параметров УВ при переменной величине (n) весьма сложен. Поэтому для инженерных расчетов часто используют метод сопряженных изоэнтроп (Ландау, Станюкович), сущность которого заключается в том, что реальная изоэнтропа расширения ПД заменяется двумя идеализированными, с постоянными значениями (k) , (γ) , причем в интервале (P_j-P_x) $n=3$, а для (P_j-P_k) $\gamma = 1.4$. При таком подходе возможно решение

$$P_x = \frac{k+1}{2} \rho_B U_x^2 , \quad (13.10)$$

где ρ_B - плотность воздуха.

Результаты расчетов начальных параметров УВ в воздухе для некоторых ВВ приведены в таблице 13.1.

Начальные параметры УВ в воздухе. Таблица 13.1

Тип ВВ	$\rho_0, \text{г/см}^3$	$D, \text{км/с}$	$P_x, \text{МПа}$	$U_x, \text{М/с}$	$U_{\max}, \text{М/с}$
ТНТ	1.62	7.00	65.7	6.53	12.8
Гексоген	1.65	8.35	89.3	7.60	14.2
Тэн	1.69	8.40	94.2	7.82	14.9

Интенсивность УВ в воздухе быстро падает. Так для сферического заряда ТНТ при $R \geq 12 \cdot R_0$ (Садовский).

$$\Delta P_{\phi} = 7 \frac{q}{R^3} + 2.7 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{R^2} + 0.84 \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R} \left(\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right), \quad (13.11)$$

где ΔP_{ϕ} - давление на фронте УВ;

q - масса заряда (кг);

R - расстояние (М).

$$D_{\phi} = c_0 \sqrt{1 + 0.83 \frac{\Delta P_{\phi}}{P_0}} \quad (\text{М/с}) \quad , \quad (13.12)$$

где D_{ϕ} - скорость фронта УВ;

P_0, c_0 - давление и скорость звука при нормальных условиях.

Продолжительность фазы сжатия (t_+) и фазы расширения (t_-)

$$t_+ = 0.0015 \cdot \sqrt{R} \cdot \sqrt[6]{q} \quad (\text{с}) \quad , \quad (13.13)$$

$$t_- = \frac{4.25 \cdot \sqrt{q}}{c_0} \quad (\text{с}) \quad . \quad (13.14)$$

При подводном взрыве ($R_{\text{пр}}$), естественно меньше, чем в воздухе

$$R_{\text{пр}} = 26.8 \cdot k \cdot \sqrt[3]{\frac{q}{h+10}} \quad (\text{см}) \quad , \quad (13.15)$$

где k - коэффициент учитывающий свойства воды;

h - глубина от поверхности воды (м).

При взрыве в воде особенно характерен пульсирующий режим расширения ПД.

$$T = 4.36 \cdot k \cdot \sqrt[3]{q} \cdot (h+10)^{-\frac{5}{6}} \text{ (с) }, \quad (13.16)$$

где T- период пульсаций.

Кроме того, пузырь ПД пульсируя поднимается к поверхности (рис. 13.3). При выходе на поверхность происходит его схлопывание и образование водяного султана. Если глубина (h) помещения заряда

$$h \geq 9 \cdot \sqrt[3]{q} \text{ (м) }, \quad (13.17)$$

то султан не возникает, т.к. газовый пузырь разрушается на много мелких пузырьков.

Выходящие на поверхность воды УВ, значительно опережающие пузырь, создают множественный всплеск (поверхностный откол).

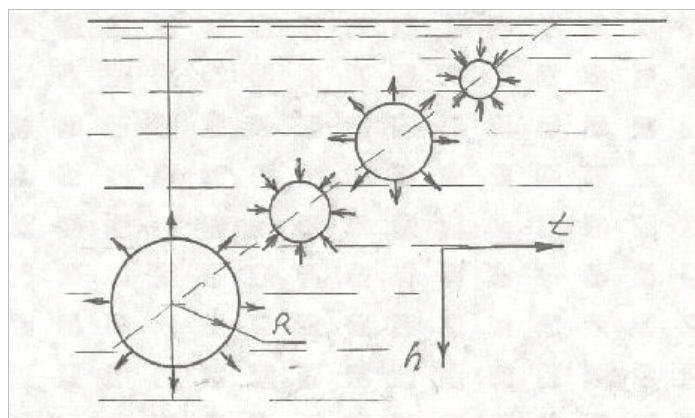


Рис. 13.3. Пульсация газового пузыря при взрыве в воде

ПД не могут вырваться на поверхность (явление камуфлета) и вытесняя грунт образуют сферическую полость (котел) - зону вытеснения.

$$R_v = (0.1 \div 0.4) \cdot \sqrt[3]{q} \text{ (м) }. \quad (13.18)$$

За пределами котловой полости образуются концентрические зоны разрушения (дробления)

$$R_d \cong 2 \cdot \sqrt[3]{q} \text{ (м) }, \quad (13.19)$$

и сотрясения грунта

$$R_c \cong 4 \cdot \sqrt[3]{q} \text{ (м) }. \quad (13.20)$$

Если же глубин заложения заряда невелика, то образуется воронка выброса (13.5)

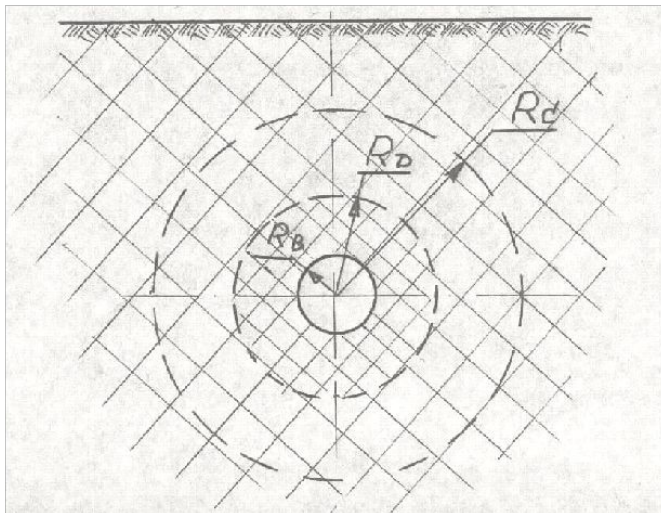


Рис. 13.4. Взрыв в грунте при большом заглублении заряда

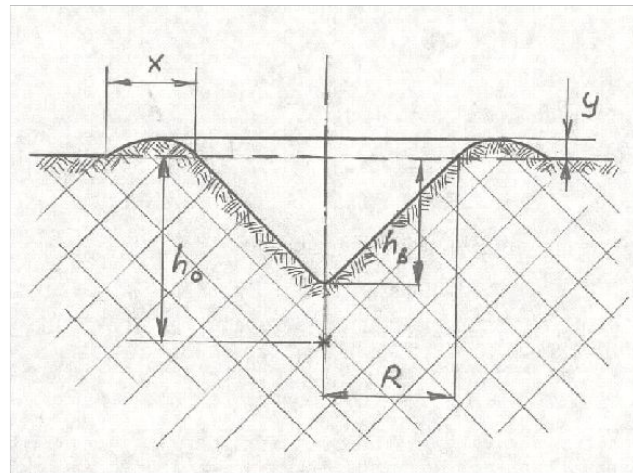


Рис. 13.5. Взрыв грунта на выброс

При взрыве на выброс необходимое количество ВВ находят как

$$q = \sum k \cdot h_0^3 (0.4 + 0.6 \cdot n^3) \quad (\text{кг}), \quad (13.21)$$

где $\sum k$ - сумма коэффициентов, учитывающих как свойства ВВ, так и свойства грунта,

h_0 - глубина помещения заряда (м),

$n = \frac{R}{h_0}$ - показатель выброса,

R - радиус воронки.

Если $R=1$ - воронка нормального выброса

$R<1$ - воронка уменьшенного выброса

$R>1$ - воронка усиленного выброса

Глубина воронки (h_v) и размеры бруствера (см. рис.13.5) могут быть найдены как

$$h_v = \frac{1}{3} \cdot h_0 (2n - 1) \quad , \quad (13.22)$$

$$x = 5n \cdot h_0 \quad , \quad (13.23)$$

$$y = 0.7 \cdot \frac{h_0}{n} \quad . \quad (13.24)$$

Бризантное действие взрыва.

Бризантность - это способность ВВ к местному разрушительному действию, которое является результатом резкого удара движущихся ПД по преграде. Бризантное действие проявляется лишь на близких расстояниях от места взрыва, где давление и плотность энергии еще достаточно велики.

Разновидностями бризантного действия являются пробивное, метательное, кумулятивное и т.п. действие взрыва.

При столкновении ПД (одномерное движение) с недеформируемой (абсолютно несжимаемой) преградой (см. модельные задачи п. 7.6) при решении системы уравнений (5.6), при условии, что после столкновения ($U=0$), с учетом (9.12) начальное давление составит

$$P_x = \frac{64}{27} P_j \quad , \quad (13.25)$$

а полный импульс, воспринимаемый стенкой

$$I = \int_0^{\infty} P dt = \frac{8}{27} m_{\text{зар.}} D \quad , \quad (13.26)$$

где $m_{\text{зар.}}$ - масса заряда.

В действительности абсолютно несжимаемых материалов не бывает, поэтому волновая картина на границе раздела “ПД - преграда” чрезвычайно сложна. Кроме того существует понятие активной части заряда (Баум, Станюкович).

Под активной понимают ту часть заряда (m_a), ПД которой разлетаются в заданном направлении. В таком случае на преграду будут оказывать воздействие только ПД, образующиеся из активной части. Можно показать, что для заряда ВВ в виде куба

$$m_a = \frac{1}{6} m_{\text{зар}} \quad , \quad (13.27)$$

в виде цилиндра (в оболочке) с $l_{\text{зар}} \gg d_{\text{зар}}$

$$m_a = \frac{4}{9} m_{\text{зар}} \quad , \quad (13.28)$$

а без оболочки (m_a) примет форму конуса, высота которого ($h_a \approx d_{\text{зар}}$), а

$$m_a = \frac{d_{\text{зар}}}{3 \cdot l_{\text{зар}}} \cdot m_{\text{зар}} \quad . \quad (13.29)$$

Если же открытый цилиндрический заряд короткий ($l_{\text{зар}} \approx d_{\text{зар}}$), то (m_a) примет форму усеченного конуса с

$$h_a = \frac{4}{9} l_{\text{зар}} \quad . \quad (13.30)$$

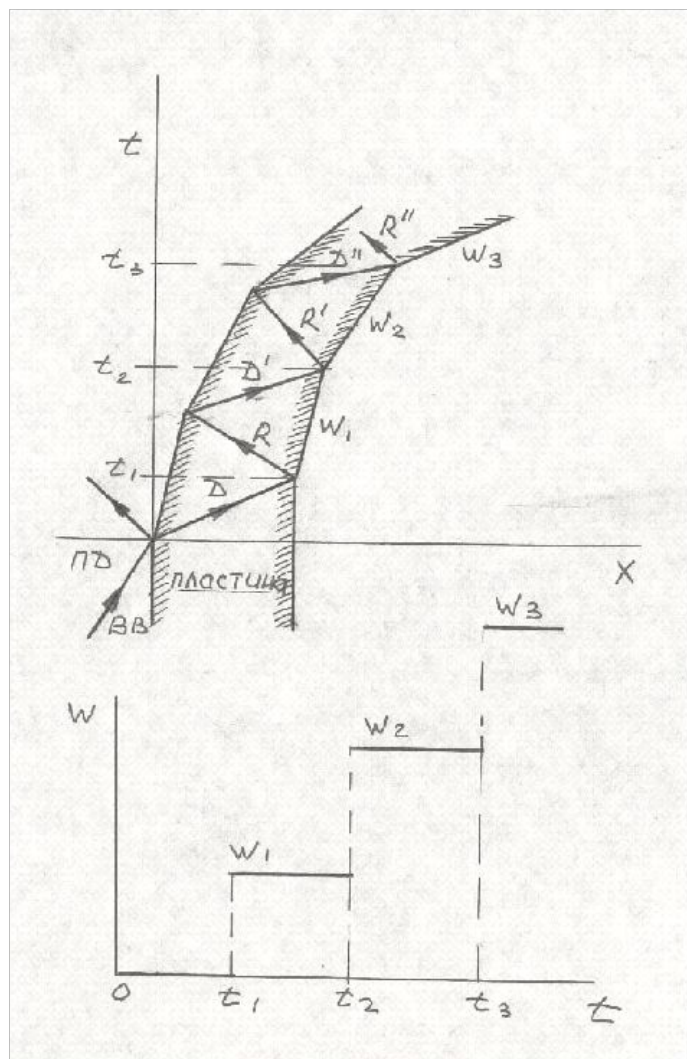


Рис. 13.6 t, x и w, t - диаграммы ускорения пластины при торцевом метании

Применение на практике понятия активной части заряда позволяет правильно выбрать наиболее целесообразные форму и размеры последнего.

Вопросы метания различных тел взрывам имеют исключительно важное значение в современной технике.

При рассмотрении вопросов метания возможно рассмотрение:

- задачи метания тела (пластины) с торцевой поверхности заряда;
- задачи о метании оболочки с боковой поверхности заряда.

При торцевом метании одномерным потоком ПД начальное ускорение (достижение первой скорости) было рассмотрено ранее.

За время первых волнообменов химические реакции уже завершаются и с тыльной стороны пластины находятся ПД. Когда ВР, распространяясь со стороны свободной поверхности, выйдет на границу раздела с ПД, пластина “попытается”, оторваться от ПД, но благодаря высокому давлению в них, они “догонят” ее, а при соударении образуется новая ударная волна в пластине - D' (см. рис. 13.6)

При выходе УВ (D') на свободную поверхность образуется новая ВР (R'), а свободная поверхность получит дополнительное ускорение, приобретая новую скорость (W_2).

Процесс волнообмена для сжимаемой пластины в дальнейшем повторится и в каждом из них пластина будет приобретать новую (большую) скорость. Скачкообразный характер увеличения скорости после третьего волнообмена сглаживается, а скорость пластины достигает своего максимального значения - $W_{\max}$.

Этот же процесс можно рассмотреть в P, U - координатах (рис. 13.7). Если масса пластины $m_{\text{пл}} \rightarrow 0$, то конечная скорость ($W_{\max}$) стремится к скорости разлета ПД.

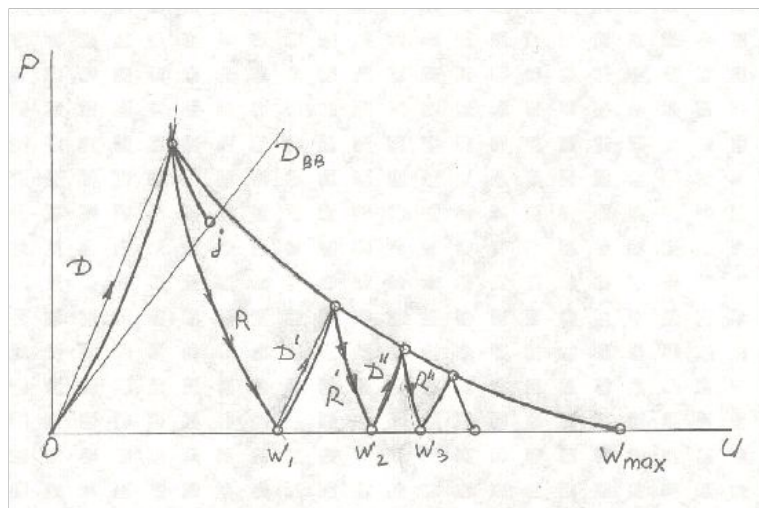


Рис. 13.7. P, U - диаграмма торцевого ускорения пластины при $m_{\text{пл}} \rightarrow 0$.

Одна из полуэмпирических зависимостей скорости метания (W) от характеристик заряда ВВ имеет вид.

$$W = \left(0.209 \cdot \sqrt[3]{\frac{2D}{d_{\text{зар}}}} \cdot \sqrt{\frac{m_{\text{зар}}}{m_{\text{пл}}}} - 0.38 \right) \cdot D \quad , \quad (13.31)$$

где D - скорость детонации;
 $m_{\text{зар}}$ - масса заряда;
 $m_{\text{пл}}$ - масса пластины;
 $d_{\text{зар}}$ - диаметр заряда (мм).

При метании с боковой поверхности заряда с использованием гипотезы мгновенной детонации получим:

$$W = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{m_{\text{зар}}}{m_{\text{об}} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^4 \right]}} \quad , \quad (13.32)$$

где $m_{\text{зар}}$ - масса единицы длины заряда;
 $m_{\text{об}}$ - масса единицы длины оболочки;
 R_0 - внутренний (начальный) радиус оболочки;
 R - текущий радиус оболочки.

Кумулятивный эффект, является частным случаем метательного действия взрыва, обусловлен концентрацией действия взрыва в заданном направлении.

Важно подчеркнуть, что максимум пробивной способности кумулятивного заряда реализуется не при контактном взрыве, а при расположении его на некотором расстоянии от преграды, которое принято называть фокусом (f).

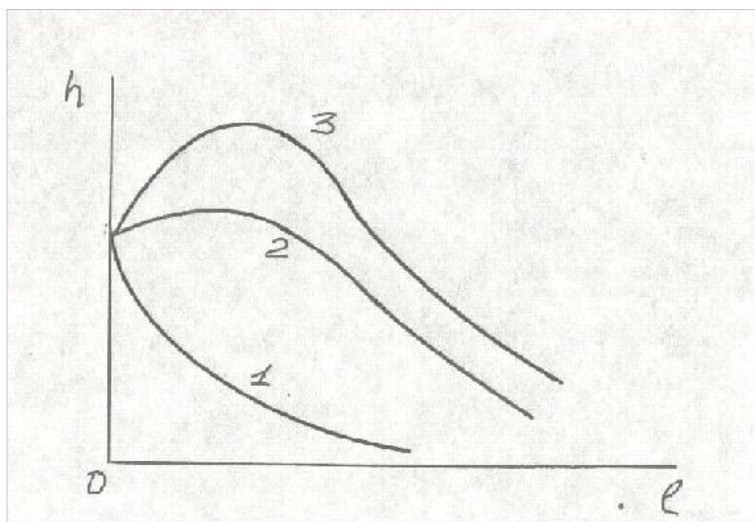


Рис. 13.8. Зависимость глубины пробития (h) от расстояния между зарядом и преградой (l)

- 1- обычный заряд (цилиндр)
- 2- заряд с кумулятивной выемкой
- 3- заряд с кумулятивной выемкой, облицованный металлом.

Наибольшей пробивной способностью обладают кумулятивные заряды имеющие металлическую облицовку выемки.

В соответствии с гидродинамической теорией кумуляции (Лаврентьев, Тейлор, Райхельбергер) под действием детонационной волны, перемещающейся вдоль поверхности выемки, металлическая облицовка, как и ПД, движутся по нормали к поверхности. Соударяясь, материал облицовки образует высокоскоростную (до $\approx 8 \text{ км/с}$) кумулятивную струю, куда расходуется $\sim 10\%$ материала оболочки, и пест, в который переходит до $\sim 90\%$ металла (рис. 13.9).

Головная часть имеет более высокую скорость, чем хвостовая часть. В результате этого по мере движения струя рассеивается и на некотором расстоянии разрывается на отдельные фрагменты.

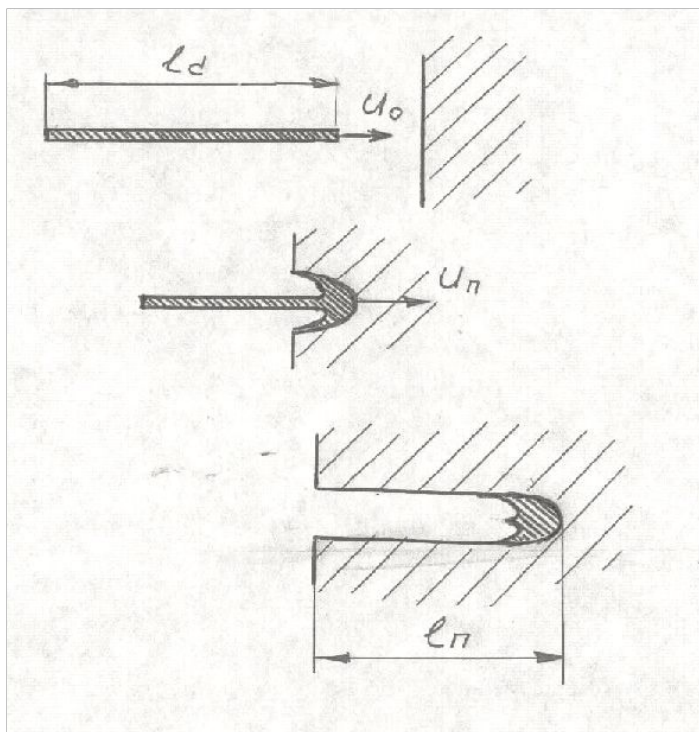


Рис. 13.9. Расчетная схема для определения глубины пробития.

Принимая, что прочность и сжимаемость соударяющихся тел (струя и преграда) одинаковы, процесс проникновения струи в преграду можно уподобить внедрению несжимаемой жидкой струи в несжимаемую преграду (рис. 13.9).

Приняв процесс внедрения установившимся, используя уравнение Бернулли для преграды

$$P_n + \frac{\rho_n u_n^2}{2} = \text{const} , (13.33)$$

для струи

$$P_c + \frac{\rho_c (u_0 - u_n)^2}{2} = \text{const} . (13.34)$$

Приравняв (13.33) и (13.34) и учитывая, что $\rho_c = \rho_n$

$$u_n = \frac{u_0}{1 + \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_c}}} \quad (13.35)$$

Время расходования струи

$$t_c = \frac{l_c}{u_0 - u_n} \quad , \quad (13.36)$$

а время проникновения струи

$$t_n = \frac{l_n}{u_n} \quad , \quad (13.37)$$

приравняв которые, получим

$$l_n = l_c \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_n}} \quad (13.38)$$

Уравнение (13.38) носит название формулы Лаврентьева.

Лаврентьев показал, что (13.38) справедлива, если $P_n = P_c > 2 \text{ Па}$, при $u_c > 4 \text{ км/с}$

Практические выводы следующие:

- 1) бронепробитие тем выше, чем выше плотность облицовки (медь, железо и т.п.)
- 2) бронепробитие тем выше, чем больше длинна струи.

Боеприпасы объёмного взрыва (БОВ, также известные как термобарические боеприпасы, объёмно-детонирующие боеприпасы (ОДБ), в англоязычных странах также употребляется термин fuel-air bomb — топливно-воздушная бомба) — вид боеприпасов, который использует распыление горючего вещества в виде аэрозоля и подрыв полученного газового облака. БОВ больших калибров сравнимы по мощности со сверхмалыми тактическими ядерными боеприпасами, но у них отсутствует радиационный эффект поражения. При этом у ударной волны термобарических боеприпасов, благодаря большому объёму подрываемой смеси, более выражена отрицательная полуволна давления, чем у обычных взрывчатых веществ.

Также существует «газетный штамп», с помощью которого у этого типа боеприпасов укоренилось неверное название — **вакуумная бомба**.

Технология

Принцип действия ОДБ основан на детонации облака горючего аэрозоля. Благодаря большому размеру облака (на порядки больше, чем размеры зарядов с конденсированным взрывчатым веществом), ударная волна сохраняет поражающее действие на большом расстоянии. Взрыв происходит в две стадии:

1. по команде взрывателя, как правило бесконтактного, подрывается небольшой заряд обычного взрывчатого вещества (его задача — равномерно распределить горючее вещество по объёму облака);
2. с небольшой задержкой подрывается второй заряд (или несколько зарядов), вызывающий детонацию аэрозоля.

В качестве горючего в ОДБ используют:

- Окись этилена.
- Окись пропилена.
- Метил- и диметилацетилен.
- Бутил- и пропилнитрит.

В настоящее время усилия инженеров, работающих над созданием термобарических боеприпасов, направлены на создание технологии образования более равномерного облака воздушно-топливной смеси и более симметричного его подрыва — то есть условий, при которых достигается максимальный эффект от взрыва.

История

По сути, объёмный взрыв — одно из первых явлений подобного характера и масштаба, с которым познакомился человек. Первые случаи объёмных взрывов были отмечены еще до нашей эры на мельницах, где взрывалась взвешенная в воздухе мука. Позже подобные случаи отмечались на мануфактурах, где взрывалась растительная пыль, и т. д. Одними из наиболее опасных в этом отношении производств являются сахарные и мукомольные заводы.