

Лекции №16,17

Взрывные явления, их природа, газодинамические параметры при взрывах, воздействие взрывов.

1. Анализ понятия и термина взрыв. Квазистатический и волновой взрывы. Взрывы в ограниченном и свободном пространстве.
2. Взрывные волны детонационного происхождения. Ударный фронт. Взрывные волны от дефлаграционных взрывов.
3. Параметры воздействия взрыва; максимальное давление взрыва, импульс волны; роль профиля волны, фаза отрицательного избыточного давления. Бризантное и фугасное действия взрыва.

1. При изучении теплового и цепного взрывов мы вкладывали в это понятие в первую очередь два свойства химических реакций; первая из которых состоит в том, что существует скрытый индукционный период реакции, когда ее обнаружить сложно, а второй характеризуется быстрым и неконтролируемым ее протеканием. В рассматриваемом случае в понятие взрыв мы будем включать химические реакции и сопутствующие им явления, в результате которых в различных зонах пространства повышается давление, в результате чего могут происходить механические изменения (разрушение) в конструкциях (структурах), расположенных в интересующем нас пространстве.

Остановимся более подробно на пунктах приведенного определения. Первый пункт ограничивает круг взрывных явлений, причиной которых являются химические реакции; тем самым из рассмотрения исключаются различные физические взрывы, вызванные такими явлениями как: электрический разряд, бурное кипение, выброс вулкана и т.д.

Рассмотрим условия, при которых в результате химической реакции повышается давление.

Условие первое: экзотермическая реакция протекает в герметичном объеме.

По первому закону термодинамики внутренняя энергия в замкнутой изолированной системе сохраняется, только внутренняя энергия химических связей переходит во внутреннюю энергию теплового движения, благодаря чему в системе повышается давление. Это легко продемонстрировать, если учесть, что повышение давления происходит в газовой среде.

Уравнение состояния газовой среды до взрыва:

$$P_0 V_0 = m_0 / \mu_0 * R T_0 \quad (1)$$

Уравнение состояния газовой среды после реакции ($V = \text{const}$):

$$P_r V_0 = m / \mu * R T_v \quad (2)$$

Для простоты рассмотрим случай, когда $\mu_o = \mu$ (равенство молекулярных весов) и $m_o = m$ (масса газовой фазы неизменна). Случай, когда масса газовых продуктов сгорания больше чем исходной смеси рассмотрен в одном из примеров в предыдущий лекции.

Вычитая уравнение (1) из (2) и за тем, поделив эту разность на (1) получим:

$$\Delta P / P_o = \Delta T / T_o \quad (3)$$

Разность температур ΔT определяется из I-го закона термодинамики. Для замкнутой и изолированной системы:

$$\Delta T = \Delta Q_v * m(t) / C_v * m_o \quad (4)$$

Соответственно

$$\Delta P = P_o * Q_v * m(t) / T_o * C_v * m_o \quad (5)$$

В выражении (5) $m(t)$ – масса сгоревшего вещества, по которому определяется тепловой эффект к моменту времени t .

Из (5) следует, что

$$d\Delta P / dt = P_o * Q_v / C_v T_o m_o * dm(t) / dt \quad (6)$$

величины $m(t)$ и $\Delta P(t)$ изменяются со временем, а dm/dt и $d\Delta P/dt$ просто пропорциональны скорости реакции. ($C_v = \text{const}$).

Таким образом, если процесс происходит в герметичном замкнутом объеме, то система не совершает работу, а если он изолирован, то отсутствует и теплоотвод, и конечное давление в системе при $m(t) = m_o$ будет равно P_v независимо от скорости реакции.

Действительно, рассмотрим следующий пример. Имеются два сосуда, в которых содержится одна и та же смесь, с одинаковым уровнем начальной внутренней энергии. Различие состоит в том, что в первом сосуде внутренняя энергия повышена за счет облучения, в результате чего образуются активные частицы, а во втором сосуде внутренняя энергия повышается за счет повышения начальной температуры. В первом случае после периода индукции происходит взрыв, а во втором случае в результате поджигания искрой происходит пламенное сгорание смеси.

Очевидно, что согласно первому закону термодинамики конечное давление в обеих случаях будет одинаковым, а вот закономерности нарастания этого давления будут различаться, причем во втором сосуде темп нарастания давления будет зависеть от скорости горения, т.е от степени турбулизации смеси (рис.1). Максимальное давление взрыва зависит от энергетических характеристик смеси и от степени заполнения объема горючей смесью. В рассмотренных на рис.1 примерах а и б давление во время взрыва меняется со временем, но во всех точках объема оно одинаково причем по разным причинам. В случае №1 цепочно-теплого взрыва давление одинаково в объеме, потому что реакция идет одновременно во всех точках с одинаковой скоростью, период индукции во всех точках объема одинаков.

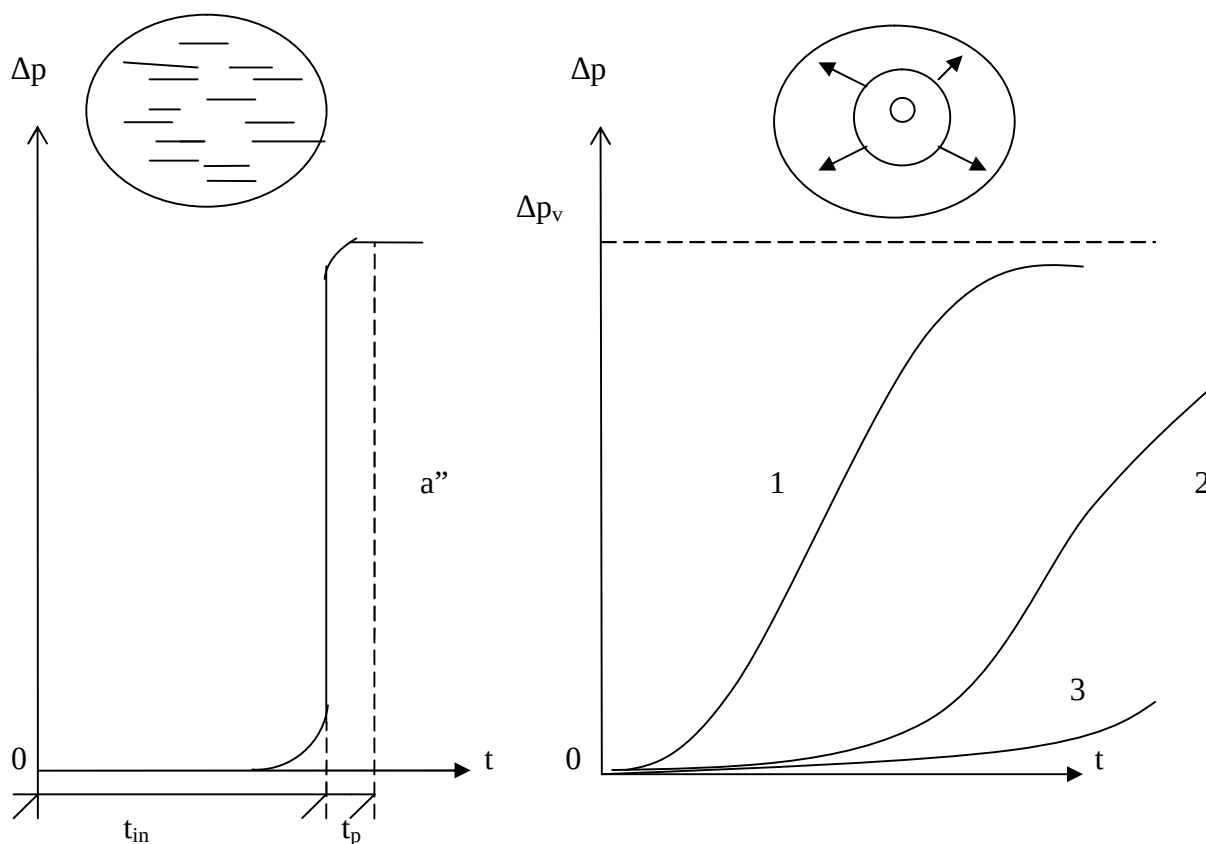


Рис.1 Изменение давления при взрыве в условиях $V=\text{const}$.

а) цепной взрыв, переходящий в тепловой. Реакция идет одновременно во всем объеме с периодом индукции. t_{in} и временем реакции t_p .

б) Пламенное горение; давление растет по мере выгорания смеси, реакция происходит в узкой зоне (пламени), кривая 1 соответствует более высокой скорости горения (повышенная степень турбулентности); 3 - скорость пламени очень мала $W \rightarrow 0$; 2 – промежуточный режим.

Пламенное горение; во время взрыва реакция идет в узкой зоне, эта зона перемещается в пространстве со скоростью W , которая намного меньше скорости звука C_o , и поэтому слабые волны, распространяющиеся от зоны горения со скоростью звука успевают выравнять давление в объеме, так как за время горения звуковые волны десятки раз пересекут зону горения, выравнявая давление по пространству. Амплитуда волн небольшая, и поэтому можно считать давление постоянным во всем пространстве.

Видоизменим опыт описанный выше. Пусть оболочка, ограждающая реакционный объем от окружающей среды будет легко растягивающейся, мыльной пленкой например.

Рассмотрим предельные случаи соответствующие бесконечно высокой скорости реакции (рис.1а, $t_p = 0$), и малой скорости распространения пламени $W=0$. Тогда для случая 1а и $t_p = 0$ горение (взрыв) произойдет в условиях $V=\text{const}$, несмотря на то что оболочка в виде мыльной пленки; а для случая малой скорости пламенного горения реализуются условия $P=\text{const}$. При горении в условиях $P=\text{const}$ происходит расширение реакционного объема от V_o до V_k , так что $V_k/V_o = 1 + Q_p/C_p T_o$, (7)

Работа расширения газов при горении в условиях $P=\text{const}$ равна:

$$W = - \int_{V_0}^{V_k} P_0 dV - P_0(V_k - V_0) - P_0 V_0 * Q_p / C_p T_0; \quad (8)$$

Знак «-» означает, что система совершает работу над окружающей средой.

Эта работа идет на медленное расширение окружающего воздуха, чтобы освободить место для расширенных продуктов реакции и только. Кинетической энергии окружающий воздух не приобретает, волна не образуется.

При реализации условий $V=\text{const}$, при мгновенной реакции, давление возрастает до величины

$$P_v = P_0(1 + Q_v / C_v T_0); \quad (9)$$

А затем произойдет адиабатное расширение продуктов взрыва, и при расширении до давления P_0 будет совершена работа :

$$W = \int_{V_0}^{V_k} P dV = \int_{V_0}^{V_k} P_v (V/V_0)^{-\gamma} * V_0 * dV / V_0 = V_0 P_v / \gamma - 1 [1 - (P_0/P_v)^{1/\gamma}] \quad (10)$$

Подставляя значение P_v , выраженное через Q_v , в последнюю формулу получим:

$$W = P_0 V_0 / \gamma - 1 [(1 + Q_v / C_v T_0) - (1 + Q_v / C_v T_0)^{1/\gamma}] \quad (11)$$

Определим отношение $W/Q_v * m$, то есть оценим долю тепловой энергии, которая переходит в энергию волны.

$$W/Q_v m = C_v T_0 / Q_v [(1 + Q_v / C_v T_0) - (1 + Q_v / C_v T_0)^{1/\gamma}] \quad (12)$$

Здесь Q_v и Q_p – удельные тепловые эффекты, C_v и C_p – удельные теплоемкости.

Из (12) и (8) следуют важные выводы: 1) чем больше Q_v тем большая доля переходит в энергию волны, т.е. чем больше плотность выделяемой при взрыве энергии, тем большая ее доля переходит в механическую энергию волны; 2) из сравнения (8) и (11) следует что чем выше скорость выделения энергии, тем большая доля, выделявшаяся при взрыве энергии, переходит в энергию волны, которая уходит от источника; 3) при стремлении времени взрыва $t_p \rightarrow 0$ и увеличении плотности выделявшейся энергии $Q_v m / V_0 \rightarrow \infty$, вся выделившаяся при взрыве энергия переходит в волну. Такой взрыв называется точечным $V_0 \rightarrow 0$ мгновенным $t_p \rightarrow 0$ и идеальным. При таком взрыве вся выделившаяся в источнике энергия переходит в энергию волны. Затем по мере удаления волны от источника механическая энергия волны затухает, происходит диссипация механической энергии в тепловую на ударном фронте волны. Ударный фронт есть место диссипации механической энергии. После того как по пространству прошла взрывная волна с ударным фронтом температура среды оказывается более высокой чем до прихода волны. Чем выше интенсивность головного ударного фронта волны тем более высокая температура остается в среде после его прохождения. Отсюда вывод: более интенсивные волны затухают быстрее.

Таким образом, если первым условием для роста давления было ограниченность реакционного объема, то вторым условием можно считать условие: 2) время химической

реакции с выделением энергии должно быть меньше времени разгрузки, то есть $t_p < (V)^{1/3}/C$;

V – объем, где происходит реакция, C – скорость звука в этом объеме.

Рассмотренные выше примеры показывают, что характер роста давления при экзотермической реакции зависит от многих факторов: от степени ограниченности пространства, от скорости и плотности выделения энергии. Взрывы, происходящие в ограниченном пространстве, например, в помещении, будем называть внутренними. Если объем, где происходит химическая реакция с выделением энергии полностью герметичен, то конечное давление в объеме после установления равновесия не зависит от скорости выделения энергии. При малой скорости горения $W \ll C$ давление в объеме имеет одинаковое значение во всех точках пространства, а изменяется только со временем. При таких скоростях давление успевает выравниваться по всему объему помещения. Взрыв носит квазистационарный характер.

Если при столь низких скоростях горения объем помещения будет частично разгерметизирован квазистационарный характер взрыва внутри помещения сохраняется.

При горении со скоростью $W \ll C_0$ в открытом пространстве квазистационарность не достигается, так как объем для выравнивания давления бесконечен, но возмущения давления в зоне горения столь малы, что их не считают взрывом, так как они не способны деформировать или разрушать какие либо конструкции. Условно верхней границей для скорости распространения пламени относительно неподвижных продуктов сгорания при квазистационарном взрыве можно считать величины $W/C_0 = 0,1$. При значениях видимой скорости меньше 35м/сек внутренний взрыв можно считать квазистационарным, а в открытом пространстве избыточное давление при таком взрыве не превышает 1,5кПа, и это явление мы не будем относить к взрыву.

В случае другого крайнего случая бесконечно большой скорости горения (цепочно-тепловой взрыв с $t_p = 0$) давление также одинаково во всех точках ограниченного объема, но взрыв является не стационарным, а мгновенным. В открытом пространстве мгновенный взрыв приводит к возникновению волны в окружающем пространстве, так как работа при расширении продуктов сгорания переводит значительную долю выделившейся при взрыве энергии в энергию волны за короткое время расширения (время разгрузки).

Пример: Оценить долю тепла, выделившегося в результате химической реакции, которое перешло в энергию взрывной волны, если $P_v/p_0 = 8,5$ а $V_k/V_0 = 7$ при $p = \text{const}$.

Решение:

Из (7) и (9) при условии что $Q_p = Q_v$ имеем $(P_v/P_0 - 1)/(V_k/V_0 - 1) = C_p/C_v = \gamma = 1,25$

Из (9) следует, что $Q_v/C_v * T_0 = 7,5$:

Подставляем полученные величины в (12)

$$\eta = W/Q_v m_0 = 1/7,5 [8,5 - (8,5)^{1/1,25}] = 0,395$$

Итак, примерно, 40% тепловой энергии переходит в энергию взрывной волны, а остальные 60% остаются в продуктах сгорания.

Предыдущее рассмотрение показало, что чем выше плотность выделения энергии (фактически чем выше давление в источнике взрыва) и чем быстрее скорость выделения энергии, тем больше энергии переходит во внешний взрыв в открытом пространстве.

Рассмотрим более подробно: почему скорость выделения энергии так влияет на возможность взрыва в открытом пространстве. При бесконечно-высокой скорости выделения энергии, то есть при мгновенном источнике взрыва выполняется условие $V=\text{const}$ при бесконечно-медленном выделении энергии в источнике выполняется условие $P=\text{const}$, и взрыв в открытом пространстве не формируется.

Что будет происходить, если время реакции конечно и равно t_p , то есть за это время вся энергия выделяется в объеме источника взрыва V_0 . Резонно предположить, что эффективность взрыва будет определяться соотношением между временем реакции t_p то есть временем нарастания давления и временем разгрузки давления, которое определяется масштабом L_0/C , где L_0 -характерный размер источника взрыва, где выделяется энергия.

$L_0=(V_0)^{1/3}$, а «с»-скорость звука в среде, заполняющей эту часть пространства, то есть в продуктах взрыва. В зависимости от соотношения между величинами t_p и L_0/c можно судить об эффективности взрыва. При $t_p < L_0/C$ имеем мгновенный взрыв, а при $t_p > L_0/C$ горение при условии $p_0=\text{const}$.

Для взрывоопасных смесей, которые мы рассматриваем (взрыв в результате химической реакции) справедливо следующее положение: полное время реакции $t_{п.в}$ от начала инициирования и до ее завершения определяется как суммарное время скрытого периода индукции τ_{in} и времени t_p , в течении которого происходит основное превращение, то есть

$$T_{п.в}=\tau_{in}+t_p$$

Так как для реакции горения $t_{in} \gg t_p$ ввиду того, что $E/RT \gg 1$, то можно полагать $t_{п.в} \approx \tau_{in}$.

В примере о мгновенном взрыве полагали, что смесь настолько однородна, что период индукции везде одинаков в реакционном объеме. Это идеализированный пример.

В реальных системах период индукции всегда имеет некоторое распределение в объеме системы и реакция начинается там, где он имеет минимальное значение (точка воспламенения). От этой точки зона реакции (зона воспламенения) будет передвигаться со скоростью : $V_{з.в}^{\circ}$

$$V_{з.в}^{\circ}=(d\tau_{in}/dx_i)^{-1} \quad (13)$$

Представленная ситуация возможна в реальных условиях и неоднократно возникала. Рассмотрим случай, когда в открытом пространстве (или в помещении) в результате разгерметизации оборудования образовалась взрывоопасная смесь. По мере развития аварийной ситуации взрывоопасная смесь проникает в помещение, или в другой ограниченный объем, где имеется источник зажигания. Смесь поджигается и происходит пламенное горение. Давление в ограниченном объеме растет, и газы начинают истекать из этого объема. Наступает момент, когда истекать начинают продукты сгорания

температура, которых $\approx 2000^\circ\text{K}$ - 2300°K и имеются активные частицы. Если скорость истечения достаточно высокая, то продукты сгорания будут перемешиваться с исходной взрывоопасной смесью рис.2

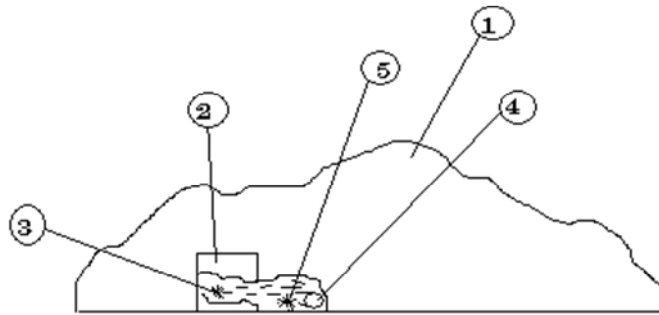


Рис.2 Схема инициирования взрыва истекающей струей продуктов сгорания.

- 1-облако исходной взрывоопасной смеси
- 2-ограниченный объем, в котором смесь поджигается
- 3-источник зажигания в ограниченном объеме
- 4-струя, состоящая из смеси продуктов горения и сходящей смеси
- 5-самопроизвольный очаг воспламенения, место где t_{in} минимально.

По мере перемешивания продуктов сгорания с исходной горючей смесью образуется новая взрывоопасная смесь с повышенной температурой и активными частицами.

Эта новая взрывоопасная смесь имеет неравномерное распределение температуры и состава, а следовательно и периода индукции. Наконец, где-то в пространстве реализуется условие для самопроизвольного самовоспламенения. В зависимости от распределения в пространстве величины периода индукции реакции воспламенения, будет реализовываться тот или иной режим горения.

Из (13) видно, что чем меньше градиент распределения периода индукции тем быстрее распространяется зона воспламенения. В результате, если распределение градиента периода индукции соответствует неравенствам:

а) $d\tau_{in}/dx > 1/U_n$

то воспламенение будет распространяться со скоростью меньшей, чем нормальная скорость пламени, но механизм теплопроводности затем может привести к горению со скоростью U_n или U_t , в зависимости от механизма теплопроводности, если молекулярная теплопроводность то- U_n , если турбулентный обмен то- U_t .

б) $1/C < d\tau_{in}/dx < 1/U_n$

В этом случае движение фронта самопроизвольного воспламенения соответствует скорости дефлаграции со скоростью горения U_g удовлетворяющий неравенству

$$U_n < U_g = V_{з.в} < C$$

Если при таком движении волны воспламенения генерируется высокий уровень турбулентности, при котором скорость турбулентного горения U_t превышает $V_{з.в}$, то реализуется режим пламенного горения соответствующий U_t .

в) $1/D \leq d\tau_{in}/dx < 1/C$

В этом случае реализуется режим сверхзвукового горения с вероятным переходом в детонацию Чепмена-Жуге.

$$d\tau_{in}/dx < 1/D$$

в этом случае реализуется режим слабой детонации с переходом в детонацию Чепмена-Жуге при выходе волны самовоспламенения в исходную горючую смесь, если очаг самовоспламенения (струя) имеет достаточные размеры.

Таким образом, режим горения в ограниченном пространстве, скорость выделения энергии при котором соответствует распространению пламени с видимой скоростью относительно неподвижных продуктов сгорания W , удовлетворяющей условию $W \leq 35$ м/сек, соответствует квазистационарному режиму, при котором давление во всех точках объема одинаково. Взрыв в ограниченном пространстве называется внутренним, и при его квазистационарном характере истечение газов из этого объема, при наличии открытых проемов, тоже квазистационарно.

Внешние взрывы или взрывы в открытом пространстве носят волновой характер, когда зона избыточного давления локализована в определенной зоне пространства, и эта зона распространяется от источника взрыва со сверхзвуковой скоростью, и давление в этой зоне затухает по мере удаления от источника, а скорость распространения стремится к скорости звука C_0 в невозмущенной среде. Это минимальная скорость распространения слабых возмущений давления.

Взрывы могут происходить внутри объема, когда он не замкнут, а имеется некоторая открытая площадь (проем), через которую газы могут истекать из этого объема при повышении в нем давления. Так происходит сброс давления при внутреннем квазистационарном взрыве, и максимальное давление в этом случае не достигает давления P_v . На рис.3 более подробно иллюстрируется изменение давления при взрыве в разгерметизированном сосуде.

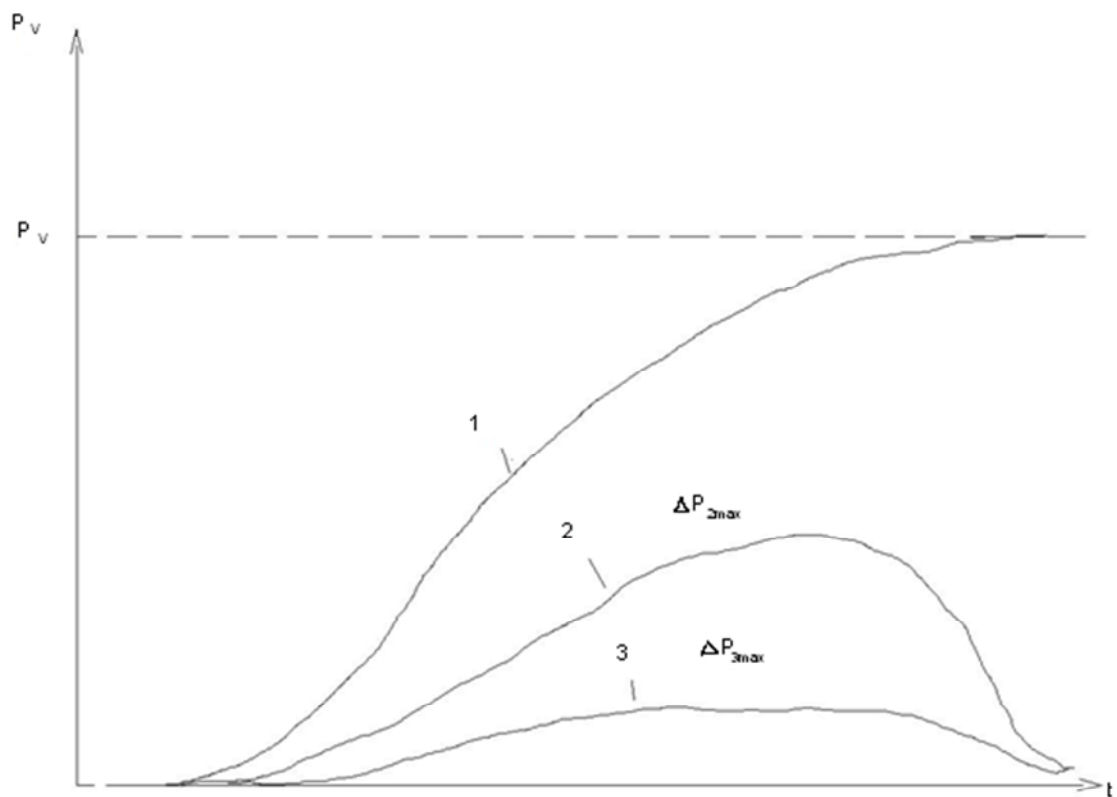
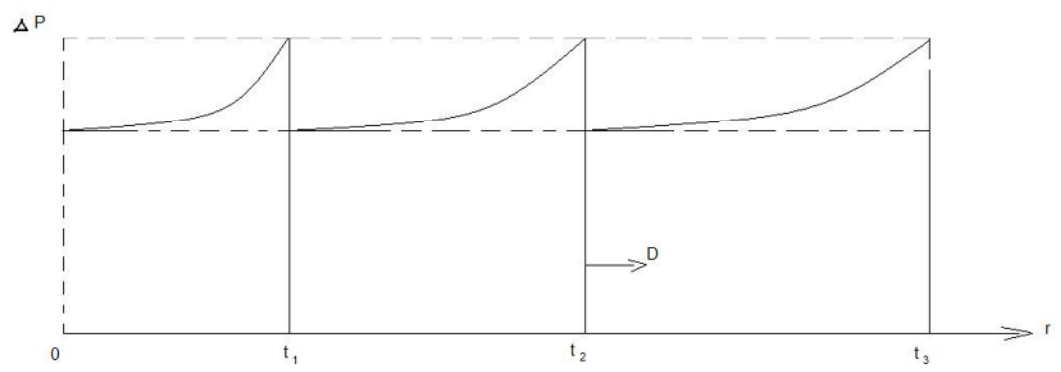
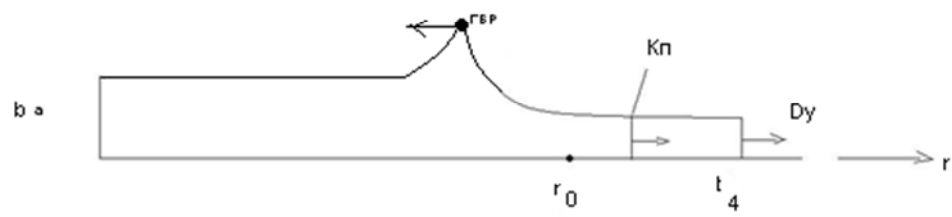


Рис.3 Динамика изменения давления при внутреннем квазистационарном взрыве :
 1)Объем, где происходит взрыв герметичный; 2)В ограждающих конструкциях имеется открытый проем площадью S_2 3) Площадь открытого проема $S_3 > S_2$, и поэтому $\Delta P_{3\max} < \Delta P_{2\max}$ (горючая смесь во всех случаях одна и та же).

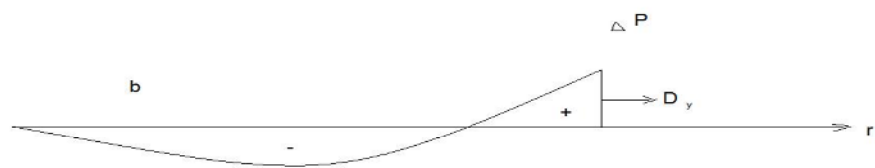
2. Важным источником взрыва является детонация –процесс сверхзвуковой. Фронт детонации распространяется по горючему веществу со сверхзвуковой скоростью, и поэтому граница горючего облака или заряда является неподвижной до прихода детонационного фронта. После прихода детонации к границе горючего облака реакция прекращается, так как за границей отсутствует горючая смесь. Поскольку за детонационным фронтом продукты детонации имеют повышенное давление и движутся в направлении распространения фронта, то начинается их расширение. В результате расширения продуктов детонации в окружающий воздух уходит ударная волна, граница продуктов детонации движется в след за ударным фронтом (расширение продуктов), а внутри продуктов сгорания распространяется волна разрежения. На рис.4 представлена схема движения среды при детонационном взрыве.

a





6



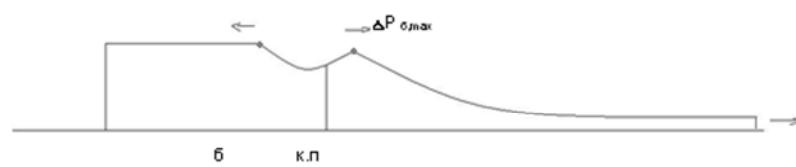
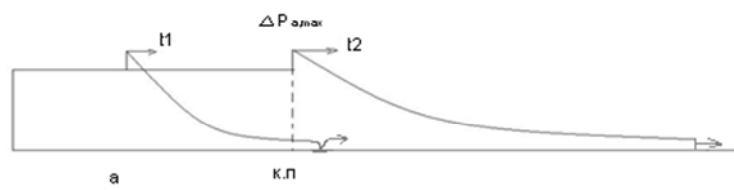
B

Рис.4 Картина течения при детонационном взрыве: а) эпюра давления внутри заряда во время детонации для различных периодов времени $t_1 < t_2 < t_3$, момент t_3 соответствует концу детонации, r_0 – радиус заряда (облака).

б) эпюра давления сразу после начала расширения продуктов детонации D_y – скорость ударного фронта воздушной волны; K_n – контактная поверхность, разделяющая продукты детонации и воздух вовлеченный в движение; ГВР – голова волны разрежения движется к центру облака, в) эпюра давления в дальней зоне $r \gg r_0$, волна ушла от источника взрыва, продукты расширились до конечного состояния.

При детонационном сгорании смеси взрыв носит ярко выраженный волновой характер - давление не выравнивается и его распределение неравномерно. И фронт детонации и фронт воздушной волны D_y имеют сверхзвуковые скорости, и поэтому при волновом характере взрыва не эффективно использовать открытые проемы для сброса давления.

По другому формируется волна при дефлаграционном сгорании газового объема. Так как скорость горения при дефлаграции дозвуковая, то при расширении неподвижных продуктов сгорания перед пламенем формируется волна уже в процессе сгорания (взрыва). Необходимо еще раз акцентировать: при детонации продукты взрыва расширяются только после того как детонация завершилась, то есть формирование взрывной волны происходит после окончания взрыва в источнике; при дефлаграционном взрыве продукты взрыва расширяются в процессе горения и формируют взрывную волну перед зоной горения уже на этой стадии рис.5. Эффективность перехода энергии взрыва в энергию волны при детонационном взрыве такая же как и при взрыве в условиях $V = \text{const}$ (35-40)%. В случае дефлаграционного взрыва эта величина зависит от скорости дефлаграционного горения. При скоростях горения соответствующих видимой скорости распространения пламени больше чем скорость звука в невозмущенном газе, то есть при $W > C_0$ волна от дефлаграционного взрыва несет механической энергии примерно столько же, что и волна от детонационного взрыва. При меньших скоростях пламени эта доля уменьшается как $\alpha^2 / (1 + \alpha^2)$ (где $\alpha = W / C_0$).



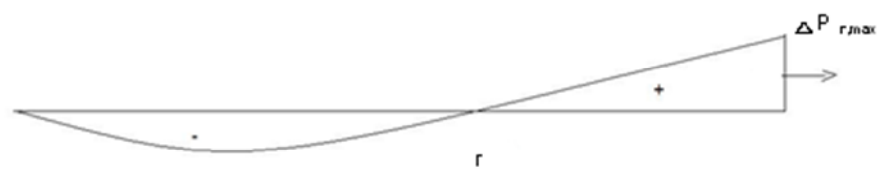
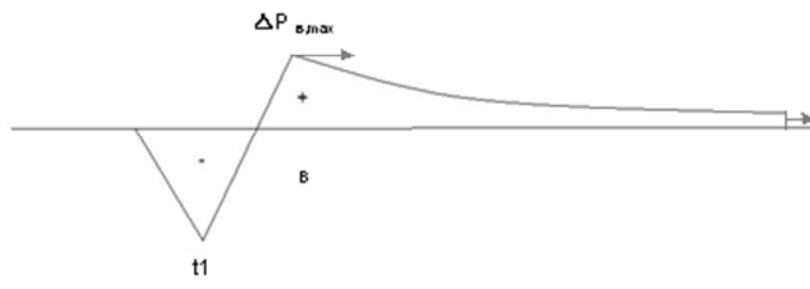


Рис.5 Характер течения при дефлаграционном взрыве: а) эпюра давления для времени $t_2 > t_1$ горение еще продолжается; максимальное давление непосредственно перед фронтом пламени. б) эпюра давления сразу после окончания горения, волны разрежения идут в разные стороны от границы между продуктами горения и воздухом контактная поверхность К.П. в) эпюра давления в дальней зоне $r > R_0$.

г) эпюра давления в очень дальней зоне $r \gg R_0$. ($\Delta P_{г, \max} < \Delta P_{в, \max} < \Delta P_{б, \max} < \Delta P_{а, \max}$)

К рис.5 уместно сделать следующие комментарии. Начальный радиус горючей смеси r_0 , к концу горения $R_0 = \sigma^{1/3} r_0$, после окончания горения две волны разрежения идут в разные стороны от контактной поверхности. В результате облако продуктов сгорания еще немного расширяется. Фаза сжатия имеет участок нарастания давления.

3. После рассмотрения вопросов связанных с развитием взрывов перейдем к описанию параметров воздействия взрыва. Наиболее просто обстоит ситуация в случае квазистационарного внутреннего взрыва. Действительно необходимо только определить характер изменения давления на ограждающие поверхности. Давление при квазистационарном взрыве определяется в результате конкуренции процессов нарастания давления за счет развития процесса горения и спада давления за счет развития процесса сброса давления в результате истечения газов через негерметичности в ограждающих поверхностях.

При квазистационарном характере изменения давления при внутреннем взрыве его определение не вызывает трудностей, если известна скорость горения.

По другому обстоит дело при определении параметров взрывной волны, так как для различных источников взрыва характерны определенные особенности в переводе энергии источника взрыва в энергию волны. Наиболее полно изучен взрыв ядерных зарядов так как он практически удовлетворяет условию идеальности, а именно условию мгновенного выделения энергии и высокой плотности ее выделения. Для правильного описания взрывной волны от ядерного взрыва в балансе энергии необходимо учесть энергию электромагнитного излучения и реальное уравнение состояния продуктов взрыва и воздуха при высоких давлениях и температурах.

Следующим по приближенности к идеальному взрыву являются взрывы, вызванные детонацией конденсированных взрывчатых веществ или ВВ. К таким ВВ относятся как жидкие так и твердые вещества. гексоген, аммотол, нитроглицерин, тротил (ТНТ) и другие. Их плотность существенно выше плотности воздуха. При детонации этих ВВ в самом заряде развиваются высокие давления и скорости продуктов детонации, то есть очень хорошо выполняются условия мгновенности взрыва и высокой плотности выделения энергии. Вся энергия, выделившаяся при детонации конденсированных ВВ, переходит в энергию волны той среды, которая окружает заряд. Таблица №1 дает представления о величинах, описывающих состояние продуктов детонации конденсированных ВВ и для сравнения значения параметров детонации газовой смеси.

Из анализа таблицы №1 видно, что параметры детонации конденсированных веществ значительно превышают соответствующие параметры состояния продуктов детонации

газовых смесей. Так давление в плоскости Ч.Ж при детонации конденсированных ВВ превышает давление Ч.Ж в продуктах газовой детонации в 10^4 и более раз, а плотность в $\sim 10^3$ раз, так что и скоростной напор $\sim \rho U^2$ в продуктах детонации конденсированных ВВ $\sim 4 \cdot 10^{11}$ раз и больше.

Таблица №1. Экспериментальные параметры детонационных волн:

ВВ	ρ_0 , г/см ³	D м/с	P _ж кПа	U _ж м/с	$\rho_{ж}$ г/см ³
Тротил	1,62	6850	$177 \cdot 10^5$	1610	2,15
Гексоген	1,65	8300	$330 \cdot 10^5$	2300	2,3
Тэн	1,66	8100	$246 \cdot 10^5$	1830	-
Нитроглицерин	1,60	7650	$253 \cdot 10^5$	2060	2,19
C ₃ H ₈ +воздух	$1,225 \cdot 10^{-3}$	1804	$186 \cdot 10$	917,2	$2,49 \cdot 10^{-3}$

Таблица №2. Начальные параметры ударных волн в среде вокруг заряда

Вещество+среда	D _y м/сек	P кПа	U м/сек	ρ/ρ_0
Тротил($\rho=1,62$)воздух	7200	$6,7 \cdot 10^4$	6530	-
Тротил($\rho=1,62$)вода	5730	$1,4 \cdot 10^7$	2380	1,71
Тротил($\rho=1,62$)железо	5140	$3,3 \cdot 10^7$	810	1,185

Понятно, что при разлете продуктов детонации в окружающую среду начальные параметры ударных волн будут выше для случая разлета (расширения) продуктов детонации конденсированных ВВ. Таблица №2 дает представление о начальных параметрах ударных волн в различных средах при детонации заряда тротила.

Остановимся на формировании ударной волны в воздухе. Ее начальные параметры определяются из:

1.условие неразрывности течения на границе раздела сред – продукты детонации имеют на границе раздела такую же скорость, что и воздух.

2.давление в обеих средах на границе раздела одинаково

3.плотность и температура терпят разрыв

4.в воздух уходит ударная волна

5.в продукты детонации уходит волна разрежения и расширение в ней проходит по изотропе, так что на небольшом расстоянии от контактной поверхности (граница раздела сред) движение можно считать плоским и использовать инвариант Римана при описании течения в волне разрежения.

Использование этих условий дает возможность определить начальные параметры течения по обе стороны границы раздела между воздухом и продуктами детонации. Эта задача в газодинамике называется задачей о распаде произвольного разрыва.

Принципиальным и очень важным результатом решения задачи о начальных параметрах течения среды сразу за пределами заряда являются:

1.начальные параметры ударной воздушной волны после газовой детонации $\sim 10^3$ кПа(10 атм) после детонации конденсированных веществ в 70-100 раз выше, то есть (700-1000 атм) $\sim 10^5$ кПа.

2.в случае, если окружающая среда имеет плотность сравнимую с плотностью продуктов детонации конденсированных ВВ, то в эту среду распространяются интенсивные ударные волны сопоставимые с параметрами детонации конденсированных ВВ, то есть эти материалы текут как сплошная среда. При газовой детонации ударная волна, в плотных средах не образуется, она отражается от них, и в этом случае плотные материалы, такие как металлы, бетон и т.д не текут.

Вернемся к воздушному взрыву. Воздушная волна формируется в результате расширения продуктов детонации и уменьшение ее интенсивности на первых порах определяется профилем детонационной волны, а поскольку параметры продуктов детонации резко падают в волне разрежения следующей за плоскостью Чипмена-Жуге, то резко падает интенсивность воздушной ударной волны непосредственно сразу после расширения продуктов взрыва. Эта причина падения давления в воздушной волне относится как к детонации газовой смеси, так и к детонации конденсированных ВВ. Для последних падение давления происходит еще благодаря диссипации механической энергии при прохождении волны высокой интенсивности ~ 500 атм. После того как воздушная волна отойдет от источника взрыва, и в ее движении будет вовлечена достаточная масса воздуха, все параметры взрывов конденсированных ВВ будут определяться исключительно энергией, выделившейся при взрыве, независимо от природы конденсированного ВВ. Максимальное давление в этой зоне определяется формулой М.В Садовского:

$$\Delta P/P_0 = 0,95m^{1/3}/R + 3,9m^{2/3}/R^2 + 13m/R^3 \quad (14)$$

Аналогичная трехчленная формула описывает изменение давления в волне газовой детонации

$$\Delta P/P_0 = 0,8m^{1/3}/R + 2,2m^{2/3}/R^2 + 1,2m/R^3 \quad (15)$$

В этих формулах m – эквивалентная масса тротила кг,

$$m = m_{ВВ} Q_{ВВ} / Q_{ТНТ};$$

$m_{ВВ}$ – масса конденсированного ВВ или горючего газа в облаке,

$Q_{ТНТ}$ – тепловой эффект взрыва тротила = 1000ккал/кг

$Q_{ВВ}$ – тепловой эффект при взрыве либо ВВ, либо горючего газа.

Профиль воздушной взрывной волны при детонационном взрыве имеет вид рис.6а. Профиль волны отличается от эпюры рис.4в тем, что в случае эпюры мы имеем мгновенный снимок поля давления в пространстве, а профиль волны это изменение давления в определенной точке с течением времени. При дефлаграционном взрыве профиль волны имеет другой вид, рис.6б Фаза сжатия имеет участок нарастания давления. Максимальное давление в волне от дефлаграционного взрыва определяется по соотношению:

$$\Delta P/P_0 = [(1 + 3/2(\gamma - 1)\sigma - 1/\sigma \alpha^2 / (1 + \alpha)^{\gamma/\gamma - 1} - 1) R_0 / R] \quad (16)$$

Где $\alpha = W/C_0$; $W = U_r \cdot \sigma$; $R_0 = r_0(\sigma)^{1/3}$; r_0 – начальный радиус взрывоопасного облака.
Выражение (16) применимо при $R > R_0$, при $R < R_0$ следует считать $R = R_0$ в (16)

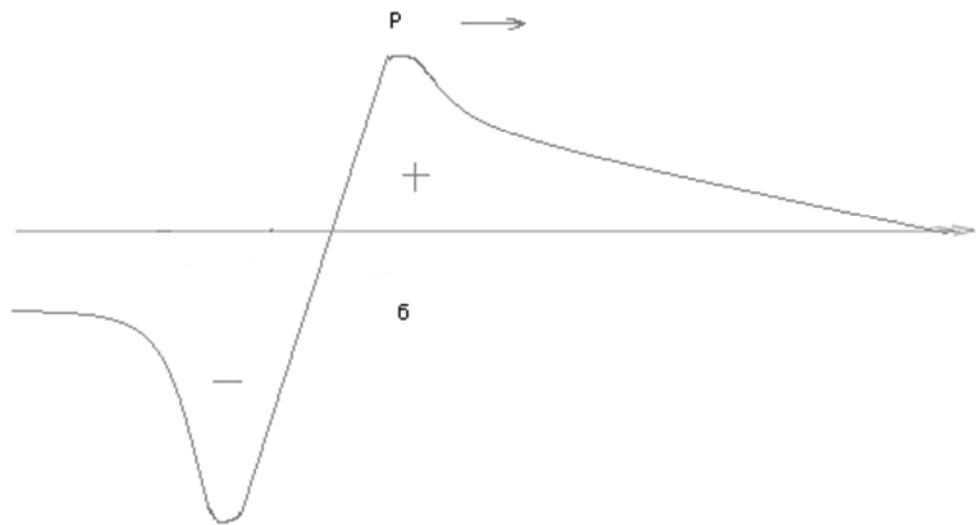
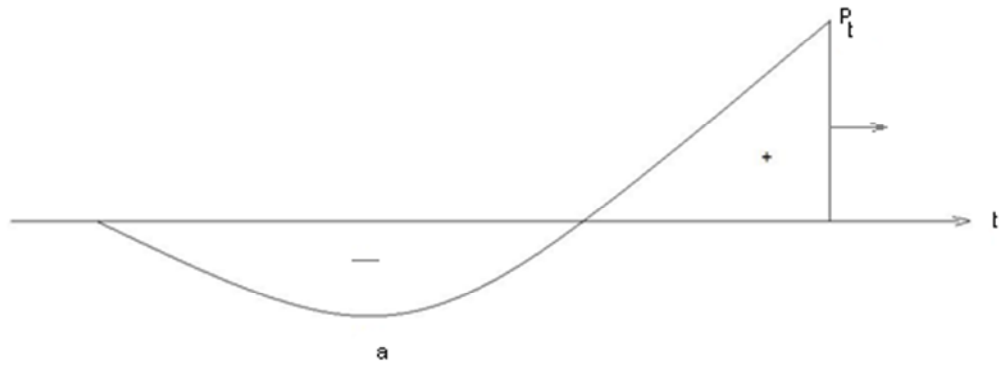


Рис.6 Профиль воздушной волны:

а)детонационный взрыв; б)дефлаграционный газовый взрыв.

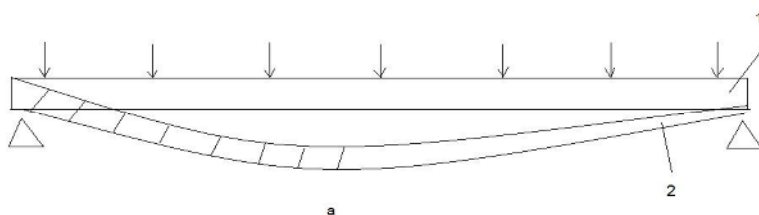
Кроме величины максимального избыточного давления в воздушной взрывной волне важной характеристикой является импульс положительной фазы, определяемый как:

$$I_t = \int_0^{t_1} \Delta P(t) dt \quad (17)$$

Где t_1 – продолжительность положительной фазы волны, где $\Delta P > 0$.

Импульс волны и максимальное давление в волне определяют так называемое фугасное действие взрыва, оно состоит в том, что воздушная взрывная волна подходит к какой либо конструкции и начинает взаимодействовать с ней. Взаимодействие, как правило, проходит по всей площади конструкции. Результатом взаимодействия является взрывная нагрузка, которая часто может рассматриваться как равномерно-распределенная и зависящая от времени. Под действием этой нагрузки конструкция деформируется. Если это балка, то она деформируется как балка и может разрушиться. Это фугасное действие, оно зависит от максимального давления и импульса волны для подобных взрывных волн, например, для волн генерированных детонаций конденсированных ВВ. Волны от дефлаграционного взрыва газовых облаков часто не подобные волнам от детонации ВВ и поэтому к ним не применимо понятие тротилового эквивалента. Это понятие используется для оценки фугасного действия взрыва, когда взрыв какого либо источника заменяется тротиловым взрывом.

Бризантным действием обладают только взрывы конденсированного ВВ, когда они находятся в контакте с конструкцией, и продукты детонации вызывают волну в материале конструкции, и он течет как сплошная среда и вытекает весь в данном месте, а конструкция как- бы разрезается в месте контакта с ВВ. Рис.7 иллюстрирует фугасное и бризантное действие взрыва.



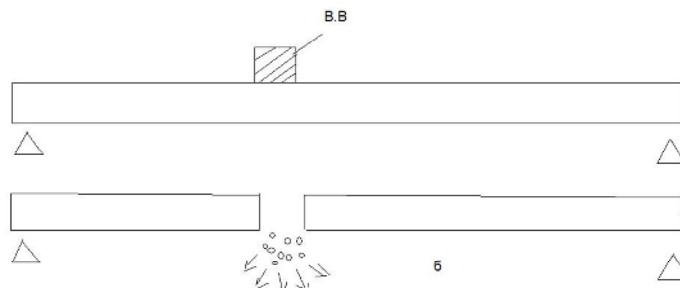


Рис.7 Действие взрыва на балку: а) фугасное действие состоит в том, что конструкция (балка) деформируется как конструкция; положение 1- балка не деформирована; положение 2 – балка деформирована в результате взаимодействия с волной.

б) Разрушение материала балки в результате бризантного действия взрыва; материал конструкции вытек под действием продуктов детонации, а сама балка может почти не деформироваться.

Основные результаты лекции.

1. Характер взрыва во многом определяется соотношением между временем развития взрыва и временем разгрузки $t_p = L/C$, где L – размер очага взрыва, а C – скорость звука в среде, где развивается взрыв.
2. При внутреннем взрыве время развития взрыва в случае дефлаграционного горения равно $t_i = L/W$; где W – видимая скорость пламени.
3. Внутренний взрыв носит квазистационарный характер, если $t_i \geq 10t_p$, что равносильно условию $W \leq C/10$, при $C \approx 350$ м/сек $W \leq 35$ м/сек условие квазистационарности.
4. Квазистационарный характер взрыва сохраняется и в случае разгерметизации объема, только $W < 35$ м/сек. Основным признаком квазистационарности является равенство давления во всех точках пространства в каждый момент времени. Со временем давление меняется по всему объему в зависимости от развития взрыва.
5. При больших скоростях горения ($W > 35$ м/сек) давление внутри помещения не полностью выравнивается по объему, то есть проявляются волновые эффекты.
6. В открытом пространстве могут реализовываться только волновые эффекты при любом источнике взрыва. Однако при низких скоростях выделения энергии, например, при скоростях пламени $W < 50$ м/сек, интенсивность волны настолько низка, что не представляет опасности для реальных конструкций и людей.

7. Наиболее разрушительные взрывы вызываются детонацией конденсированных ВВ. При детонации таких зарядов продукты детонации имеют такие высокие параметры, что при контакте с ними в движении приходит вещество твердой среды, которая граничит с зарядом. В этом заключается бризантное действие взрыва.

8. После того как волна удалится от источника взрыва настолько, что в движении вовлечется достаточное количество окружающего воздуха, взрывные воздушные волны от детонации конденсированных ВВ подобные друг другу, и их параметры определяются выделившейся при взрыве энергии. На основании этого взрывы всех конденсированных ВВ сводятся к взрыву эквивалентного по энергии количества тротила. Такова логика появления понятия тротиловый эквивалент.

9. При детонации газовых зарядов взрывные воздушные волны имеют профиль похожий на профиль волны от взрыва тротила, хотя полного подобия нет, поэтому понятие тротилового эквивалента газовой детонации следует учитывать не только удельную энергию сгорания газа, но и тот факт, что при расширении продуктов газовой детонации в энергию волны переходит только часть энергии взрыва, примерно, 0,4. Таким образом, тротиловый эквивалент для углеводородов в среднем можно оценить как:

$$\eta = 0,4 \cdot \frac{Q_{C_nH_m}}{Q_{THT}} = 0,4 \cdot \frac{10,2 \cdot 10^3}{10^3} \approx 4 \frac{\text{кг ТНТ}}{\text{кг } C_nH_m}$$

Из оценки следует, что энергетический эквивалент углеводородов, примерно, составляет величину $10 \text{ кг} \cdot \text{тнт} / \text{кг } C_nH_m$.

10. При дефлаграционном взрыве в открытом пространстве доля энергии источника перешедшей в волну зависит от скорости взрывного сгорания, и кроме того профиль волны от дефлаграционного взрыва до скорости $W=350 \text{ м/с}$ отличается от профиля волн, вызванных детонацией, и поэтому понятие тротилового эквивалента здесь неприменимо. При скоростях горения соответствующих $W>350 \text{ м/сек}$ дефлаграционные взрывные можно считать как детонационные.

11. Газовые взрывы не обладают бризантным действием по отношению к строительным материалам. Разрушение строительных конструкций при газовых взрывах, и взрывах конденсированного ВВ на тех расстояниях, при которых уже формируется воздушная волна, вызывается, так называемым, фугасным действием взрыва. Фугасное действие состоит в том, что волна падает на конструкцию и формирует равномерно-распределенную нагрузку. Под действием этой нагрузки происходит деформация конструкции, балка деформируется как балка, плита как плита и т.д. То есть действующая взрывная нагрузка создает изгибающий момент, производит смятие, кручение, вызывает срез и другие возможные виды деформации.

Это значит, что в конструкции возникают напряжения в соответствии со схемой работы конструкции, и ее разрушение происходит также, если бы нагрузка была не взрывной, а обыкновенной статической. При бризантном действии конструкция не работает как конструкция, а разрушается материал конструкции, когда приходит в движение как сплошная среда. Грубо говоря, при бризантном действии ВВ действует как «своеобразный нож».

Вопросы для домашней работы.

1. Ограничения к понятию квазистационарного взрыва.
2. Условие для возможности взрыва в открытом пространстве.
3. Возможные взрывные превращения при цепном и тепловом взрывах в облаке.
4. Детонационный и дефлаграционный взрывы.
5. Что такое энергетическое подобие волн.
6. Что такое тротиловый эквивалент.
7. От чего зависит доля энергии, которая переходит в волну. Что такое идеальный источник взрыва?
8. Что такое профиль волны?
9. Что такое импульс положительной фазы волны?
10. Чем отличаются между собой профили волны от детонации и дефлаграции.
11. В чем заключается бризантное действие взрыва.
12. В чем заключается фугасное действие взрыва?