

## Лекция 2

Взрывные нагрузки при внутреннем взрыве.

1. Режимы взрывного превращения.

2. Квасистатический режим взрыва в герметичном пространстве.

3. Квасистатический режим взрыва в разгерметизированном пространстве.

4. Разгерметизация объёма, в котором происходит квазистатический взрыв во время протекания взрыва.

1. Аварийные взрывы внутри помещения могут проходить в разных режимах. Рассмотрим наиболее возможные:

А. помещение загазовано. Имеется взрывоопасная смесь. От слабого источника зажигания смесь воспламенилась, и по ней начала распространяться волна горения. Скорость пламени соответствует таким значениям, что давление перед фронтом пламени не превышает несущей способности основных несущих конструкций. Характерное значение такой скорости  $W=40$  м/с. То есть скорость горения не должна превышать  $U_r = \frac{W}{c} = \frac{40}{7} = 5,7$  м/с. Это значит, что интенсификация горения  $X$  не должна превышать следующих значений:

$$X = \frac{U_r}{U_n}$$

$$X = \frac{5,7}{0,4} = 14,25 \text{ для большинства углеводородов}$$

$$X = \frac{5,7}{0,8} = 7,1 \text{ для этилена}$$

$$X = \frac{5,7}{1,56} = 3,65 \text{ для ацетилена}$$

$$X = \frac{5,7}{2,8} = 2,05 \text{ для водорода}$$

$U_n$  - скорость ламинарного горения соответствует горючей смеси

Из курса ТГВБ мы знаем, что наиболее охотно ускоряются как раз хорошо горючие смеси и для них характерное значение  $X$  обусловлено только неустойчивостью пламени составляет  $X=5$ , что даже не подходит при взрыве ацетилена и водорода и создаёт критическое условие для взрыва этилена. При взрыве большинства горючих, у которых скорость ламинарного горения не превышает  $U_n=0,5$  м/с. Для горючих смесей с участием водорода, ацетилена и этилена такие решения возможны, если в условиях аварийного истечения горючих газов смесь их с воздухом далека от стехиометрии и скорость ламинарного горения  $U_n < 0,5$  м/с. Режим взрыва, при котором скорость пламени удовлетворяет условию  $W < 40$  м/с, отметим что при этом удовлетворяются такие условия  $\alpha = \frac{W}{c_0} < 0,12$ , является квазистатическим.

При таком характере взрыва:

А) волновые эффекты отсутствуют

Б) давление во всех точках помещения имеет одно и тоже значение (успевает выравняться), т.е. давление изменяется со временем по гидростатическому закону (одновременно во всех точках).

Б. Помещение загазовано и инициирование или развитие взрывного процесса происходит таким образом, что изменение давления происходит с такой скоростью, что оно (давление) не успевает выравняться по всему объёму, то есть носит волновой характер. Такой режим взрыва может реализоваться если:

а) происходит интенсификация горения и скорость пламени  $W > 40$  м/с. Такая интенсификация горения возможна при сильной турбулизации исходной горючей смеси, либо в результате развития взрыва (прохождение пламени через преграды), либо до инициирования горения.

б) происходит инициирование не слабым источником, а сильным взрывом в оборудовании, в результате чего происходит интенсивная турбулизация как газа в помещении, так и интенсивное перемещение горючей исходной смеси и продуктов взрыва, может либо развиваться горение с очень высокой скоростью, либо в зоне смешивания произойдёт тепловой или цепочно-тепловой взрыв, который генерирует взрывную волну или даже детонацию.

В дальнейшем рассматривается только квазистатический характер взрыва.

2. Процесс квазистатического взрыва начинается сразу после инициирования горения, и затем волна горения распространяется по всему пространству, загазованному горючей смесью. На рис. 1 представлена иллюстрация изменения давления в герметичном объёме по мере развития взрыва

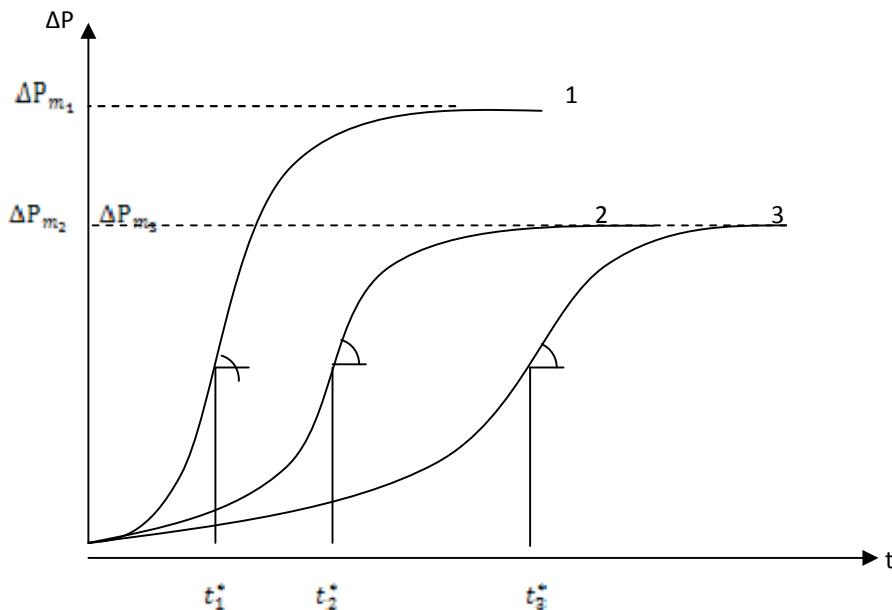


Рис. 1 кривые 1, 2 и 3 соответствуют различным случаям протекания взрыва в герметичном объёме  $\Delta P_{m1} > \Delta P_{m2} = \Delta P_{m3}$  (max давление взрыва)

$$\left(\frac{d\Delta P_1}{dt}\right)_{\max} > \left(\frac{d\Delta P_2}{dt}\right)_{\max} > \left(\frac{d\Delta P_3}{dt}\right)_{\max}$$

Зависимость  $\Delta P(t)$  на рис. 1 показывает, что давление взрыва монотонно растёт по мере выгорания горючей смеси. Смесь, соответствующая кривой 1 соответствует смеси, тепловой эффект при сгорании которой больше, чем для смесей, соответствующих кривым 2 и 3. Максимальное давление  $\Delta P_m$  как раз и есть мера энергии, выделившейся из химической в тепловую. Уроме того, кривые 1, 2 и 3 на рис. 1 отличаются максимальным теплом нарастания давления  $\left(\frac{d\Delta P_1}{dt}\right)_{\max} > \left(\frac{d\Delta P_2}{dt}\right)_{\max} > \left(\frac{d\Delta P_3}{dt}\right)_{\max}$  эта величина в основном зависит от скорости горения исходной горючей смеси, и она в большей степени определяет опасность взрыва.

Рассмотрим процесс развития взрыва в герметичном объёме, исходя из предположения, что текущее давление взрыва в объёме зависит от доли сгоревшего вещества.

$$P(t) - P_0 = (P_m - P_0) \frac{M(t)}{M_0}$$

Здесь  $P_m$  максимальное давление взрыва, характерное для рассматриваемой смеси,  $M_0$  - общее количество горючей смеси в полностью загазованном объёме,  $M(t)$  - масса вещества (смеси), сгоревшего к моменту  $t$ ,  $P(t)$  - давление в момент  $t$ ,  $P_0$  - начальное давление.

Продифференцируя уравнение (1) и используя определение скорости горения

$$\frac{dM}{dt} = p_1(t) U_g A_n, \text{ получаем}$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \Delta P_m \frac{p_1(t) U_g A_n}{M_0} \quad (2)$$

$P_1(t)$  - текущая плотность исходной горючей смеси в момент  $t$ , при давлении  $P(t)$ ,  $U_g$  - скорость горения,  $A_n$  - площадь горения в момент времени  $t$ .

$M_0 = \rho_0 V_0$ ,  $\rho$  - начальная плотность смеси,  $V_0$  - объём сосуда. Из уравнения (2) легко получить выражение:

$$\frac{dP}{dt} V^{\frac{1}{3}} = \Delta P_m \left( \frac{P(t)}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}} U_g \frac{A_n}{V_0^{\frac{2}{3}}} \quad (3)$$

Если проанализировать выражение (3) для сосудов одинаковой формы, но разных размеров, и рассмотреть для обоих случаев одну и ту же смесь, то есть положить, что произведение  $\Delta P_m \cdot U_g$  то же самое, то можно предположить, что максимальное значение левой части будет одним и тем же. То есть будет выполняться условие:

$$\left( V_1^{\frac{1}{3}} \frac{dP_1}{dt} / \max \right)_1 = \left( V_2^{\frac{1}{3}} \frac{dP_2}{dt} / \max \right)_2 \quad (4)$$

для двух различных сосудов с объёмом  $V_1$  и  $V_2$ . Это известный закон корня кубического. Действительно для подобных сосудов  $\left( \frac{A_n}{V_0^{\frac{2}{3}}} \right)_{\max}$  - будет одинаковым, когда площадь горения максимальна. Это значение

максимальной площади оценивается из геометрических соображений в зависимости от формы сосуда. Далее если предположить, что в начальный момент развития процесса  $G = G_0$  и очаг горения имеет сферическую форму и площадь горения:

$$A_n = 4\pi r^2 = 4\pi (U_g t)^2$$

$\beta = 1$  при иницировании в объёме, то есть при удалении от стенок;  $\beta = \frac{1}{2}$  при иницировании в плоскости огорождения. Далее для кратности полагаем  $\beta = 1$ ,  $G = \frac{p_1}{p_2}$  - степень расширения.

После интегрирования (2) получаем

$$\frac{\Delta P(t)}{\Delta P_m} = \frac{4\pi}{3} \beta \frac{U_g^3 t^3 G^2}{V_0} \quad (5)$$

Изменение давления в герметичном объёме будет следовать соотношению (5) до тех пор, пока не будет нарушена герметичность, то есть не начнётся вскрытие легко вскрываемых конструкций. Давление, при

котором начинается этот процесс, называется давлением вскрытия, оно различно для различных типов конструкций и обозначается  $\Delta P_v$ .

Различают безынерционные, вскрывающиеся мгновенно ЛСК, к последним относятся стекло, и энэртионные ЛСК, вскрытие которых происходит постепенно, с постепенным увеличением площади истечения.

Время до вскрытия из (5)

$$t_v = \frac{1}{U_{\tau\sigma}} \left( \frac{3\sigma V_0}{4\pi\beta} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\Delta P_E}{\Delta P_m} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Если взрывное горение инициируется в разгерметизированном объёме, то рост давления будет сдерживаться истечением газов через открытые проёмы. В этом случае при условии  $\Delta P/P_0 \ll 1$

$$\frac{d\Delta P}{P_0 dt} = \frac{(\sigma-1) U_{\tau} A n - S_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{P_1}} (\zeta + (1-\zeta)\sqrt{\sigma}}{\frac{V_1}{\gamma_1} + \frac{V_2}{\gamma_2}}$$

$A n^*$  - максимальная площадь пламени.

4. Для определения реакции конструкций на действие взрыва необходимо знать характер изменения давления в помещении с учётом разгрузки давления через вскрывающиеся в процессе взрыва проёмы. До начала вскрытия закономерность описывается (5). Дальнейшее изменение давления связано с очень разнообразными особенностями вскрытия ЛСК. Учесть это разнообразие с учётом всех деталей невозможно, и по этому принимается модельная схема определения нагружения ограждающих конструкций. В качестве модельного варианта используется треугольная форма изменения давления рис.4

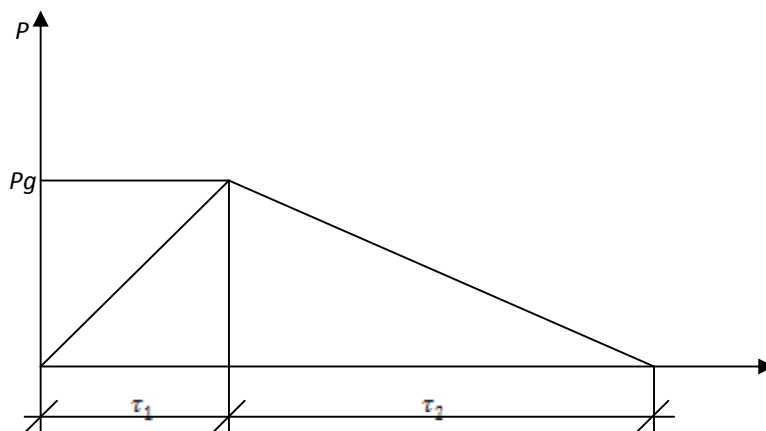


Рис. 4 Принятое изменение давления во времени.  $\Delta P_g$ - допускаемое давление.  $\tau_1$ - время нарастания давления;  $\tau_2$ - время спада давления.

Для того, чтобы оценить время  $\tau_1$  и  $\tau_2$  проведём оценки и примем дополнительные предложения. До вскрытия первых ЛСК давление изменяется по (1.3). Время нарастания до этого давления.

$$t_E = \frac{1}{U_{\tau\sigma}} \left( \frac{3\sigma V_0}{4\pi\beta} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\Delta P_1}{\Delta P_m} \right)^{\frac{1}{3}} = t_0 \left( \frac{\Delta P_E}{\Delta P_m} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$t_B = \frac{1}{U_{r\sigma}} \left( \frac{3\sigma V_0}{4\pi\beta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$\Delta P_v$ - давление вскрытия ЛСК

Рассмотрим условие образования второго пика, когда площадь пламени  $A$  достигает максимума, а площадь открытых ЛСК  $S_o$ . Это условие выглядит так:

$$U_{r\sigma}(\sigma - 1)A^*n - S_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_1}} K_{n2} = 0 \quad (10)$$

$$K_{n2} = (\zeta + (1 - \zeta)\sqrt{\sigma}) \quad (11)$$

$\zeta$ - доля открытых проёмов, через которые истекает холодный газ.

Для геометрических подобных проёмов и подобного расположения ЛСК можно записать:

$$A_n^* = K_{\phi\tau} V_0^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

где  $K_{\phi\tau}$  коэффициент, учитывающий форму взрывоопасного помещения и расположения ЛСК.

$$K_{\phi\tau} = \frac{4AB}{V_0^{\frac{2}{3}}} \left( 1 + \frac{L}{SA} \right) \quad (13)$$

$A, B, L$  – стороны взрывоопасного помещения, удовлетворяющего условию  $L \geq B \geq A$ .

$S_o$ - общая площадь открытых проёмов

$\zeta$ - доля открытых проёмов, через которые истекает холодная смесь.

$V_1$ - объём, занятый исходной смесью.

$V_2$ - объём продуктов взрыва,  $p_1 \approx p_0$   $V_1 + V_2 = V_0$

Максимальное возможное избыточное давление в герметичном объёме при взрыве газа или пылевоздушных смесей  $\Delta P_m$  составляет сотни кПа, а здания при внутреннем взрыве выдерживают давление в 100 раз меньше и поэтому, чтобы защитить его от разрушения с помощью сброса давления через разгерметизированные проёмы необходимо:

1) Начать сброс давления при меньших его значениях, то есть при  $\Delta P_v < 2-3$  кПа.

2)Площадь сбросных проёмов должна быть достаточно большой, Чтобы темп нарастания давления был не слишком высокий, а максимальное давление, достигаемое во время взрыва, было не больше, чем допустимое. ЭТО ДАВЛЕНИЕ КОТОРОЕ ЗДАНИЕ МОЖЕТ ВЫДЕРЖАТЬ, без потери несущей способности.

На рис. 2 представлена иллюстрация действия вскрытых проёмов во время взрыва.

7

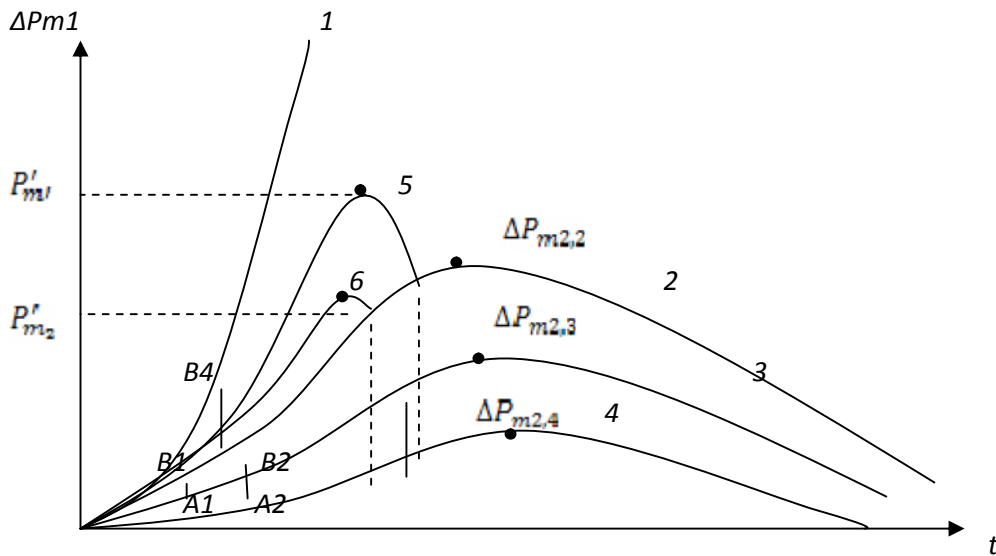


Рис. 2. Изменение давления при различных сценариях вскрытия ЛСК. Линия 01- герметичный объём.  $\Delta P_{в1}$  - вскрытие остекления типа №1,  $\Delta P_{в4}$  - вскрытие инерционного ЛСК. Линия 02,03, и 04 разгерметизированный объём  $So2 < So3 < So4$ . Линия B1A1B2A2B3A3- последовательное вскрытие различных типов стекол с различными  $\Delta P_{в1} < \Delta P_{в2} < \Delta P_{в3}$ ,  $\Delta P_{в4}$  - давление вскрытия инерционного ЛСК, линия 05- вскрытие более инерционного ЛСК, 06- вскрытие менее инерционного ЛСК  $\Delta P_{m1} < \Delta P'_{m1}$ ,  $\Delta P_{m1}$  - давление на первом пике,  $\Delta P_{m2,1}$  - давление на втором пике.

Точки (B1,  $\Delta P_{m1}$ ,  $\Delta P'_{m1}$ ) первые пики давления при вскрытии ЛСК как инерционных, так и безинерционных.

Точки ( $\Delta P_{m2,2}$ ,  $\Delta P_{m2,3}$ ,  $\Delta P_{m2,4}$ ) вторые пики, соответствующие максимальной площади пламени, когда последнее касается стенок помещения см. Рис. 3.

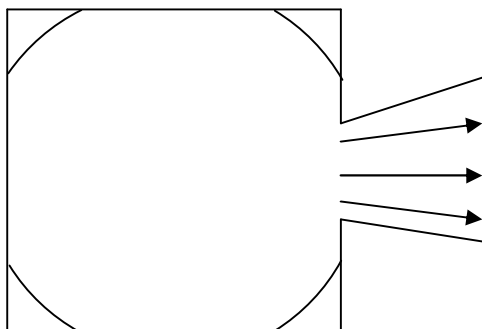


Рис. 3. Момент наступления второго пика.

Если обозначить через  $\Delta P_{\text{в}}$  максимально допустимое давление взрыва, то требуемая площадь открытых проёмов равна:

$$S_0 = \frac{U_T(\sigma-1)K_{\text{фТ}}V_0^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{2\Delta P_{\text{в}}K_{\text{н2}}}} K_3 \quad (14)$$

Коэффициент  $K_3$  отражает степень загазованности объёма горючей смесью.

При степени загазованности  $\mu$ :

$$\mu = \frac{V_3}{V_0} > \frac{1}{\sigma} \quad K_3 = 1 \quad (15)$$

При меньших  $\mu$ ,  $K_3$  определяется интерполяцией, до  $\mu$  соответствующего величине, когда помещение уже не будет взрывоопасным.

Поскольку степень загазованности величина трудно определяемая на практике, то часто  $K_3=1$ . Если  $\Delta P_{\text{в}}$  выразить в кПа, то:

$$S_0 = \frac{0.1U_T(\sigma-1)AB \left(1 + \frac{L}{5.6A}\right) p_1^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{\Delta P_{\text{в}}K_{\text{н2}}}} \quad (16)$$