

# Лекция 11

# Теория горения и взрывов

доктор технических наук, профессор  
Лепешкин Олег Михайлович

---

## **Тема 4: Самовоспламенение и возгорание**

### **Учебные вопросы**

- **Расчет и экспериментальное определение характеристик взрыва**
-

## Учебная литература:

- 1. Зинченко А.В. Теория горения и взрыва, 2016.  
URL:  
[http:// elib.spbstu.ru/dl/2/s16-138.pdf](http://elib.spbstu.ru/dl/2/s16-138.pdf)**
-



# **Расчет и экспериментальное определение характеристик взрыва**

---

## Теоретический расчет избыточного давления взрыва

Основным поражающим действием взрывчатых веществ является ударная волна. Поэтому для определения поражающего действия взрывчатого вещества необходимо рассчитать избыточное давление взрыва.

$$\Delta p = p - p_0, \quad (18.1)$$

где  $p$  – давление на фронте ударной волны;

$p_0$  – давление невозмущенного воздуха – атмосферное давление (101 кПа).

Величина  $\Delta p$  зависит от типа взрывчатого вещества, массы взорванного заряда, расстояния от центра взрыва и характера подстилающей поверхности.

Расчет величины избыточного давления  $\Delta p$  проводится в два этапа. На первом этапе находится приведенный радиус зоны взрыва по формуле:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{2KMT_{\text{Э}}}}, \quad (18.2)$$

где  $R$  – расстояние от центра взрыва, м;

$M$  – масса заряда, кг;

$K$  – коэффициент, учитывающий характер подстилающей поверхности;

$T_{\text{Э}}$  – тротиловый эквивалент взрывчатого вещества.

Значения коэффициента  $K$  для разных материалов подстилающей поверхности

Материал подстилающей поверхности	Коэффициент $K$
Металл	1.00
Бетон	0.95
Дерево	0.80
Грунт	0.60

Тропиловый эквивалент, как было показано выше, – это отношение массы взрывчатого вещества к массе тротила, создающей одинаковое поражающее действие. При  $T_{\text{Э}} < 1$  взрывчатое вещество обладает более сильным разрушающим действием, чем тротил (на один килограмм взрывчатого вещества); при  $T_{\text{Э}} = 1$  взрывчатое вещество имеет такую же разрушающую силу, как и тротил; при  $T_{\text{Э}} > 1$  взрывчатое вещество будет производить меньшее разрушающее воздействие, чем тротил.

На втором этапе по рассчитанному значению приведенного радиуса  $\bar{R}$  рассчитывается величина избыточного давления  $\Delta p$ . При этом зависимости от

величины  $\bar{R}$  используются разные формулы. Для значений  $\bar{R} \leq 6.2$  расчет избыточного давления взрыва проводится по формуле:

$$\Delta p = \frac{7}{3 \cdot \left( \sqrt{1 + \bar{R}^3} - 1 \right)}, \text{ кПа} \quad (18.3)$$

Для значений  $\bar{R} > 6.2$  расчетная формула для избыточного давления взрыва имеет вид:

$$\Delta p = \frac{70}{\bar{R} \cdot \left( \sqrt{\lg \bar{R}} - 0.332 \right)}, \text{ кПа} \quad (18.4)$$

Используя рассчитанные значения избыточного давления взрыва  $\Delta p$ , можно провести оценку степени разрушения, производимого взрывом. При оценке поражающего действия взрывчатого вещества выделяют четыре зоны разрушения объектов, характеристики которых приведены в табл. 18.2.

## Зоны разрушения объектов при разных значениях избыточного давления взрыва

Зона разрушения	$\Delta p$ , кПа
Полное разрушение	Более 50
Сильные разрушения	30 ÷ 50
Средние разрушения	20 ÷ 30
Слабые разрушения	10 ÷ 20

Для оценки степени разрушения зданий и сооружений при конкретном взрыве можно использовать данные таблицы 18.3, в которой указаны разрушения зданий и сооружений при различных предельных значениях избыточного давления взрыва  $\Delta p$ .

Таблица 18.3

Значения предельного избыточного давления, вызывающие различную степень разрушения зданий и сооружений

$\Delta p$ , кПа	Степень разрушения	$\Delta p$ , кПа	Степень разрушения	$\Delta p$ , кПа	Степень разрушения
0.5÷3.0	Частичное разрушение остекления	12	Разрушение перегородок, оконных рам	30	Разрушение кирпичных и блочных стен
3÷7	Полное разрушение остекления	15	Разрушение перекрытий	90	Разрушение железобетонных конструкций



## Концентрационные пределы взрыва

*Концентрация пара горючей жидкости или газа в воздухе, ниже которой горючая смесь не способна взрываться, но выше которой способна гореть со взрывом, называется нижним пределом взрыва (НПВ).*

Смесь любого газа или пара при нижнем пределе взрыва содержит избыток воздуха. Так, для оксида углерода коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 2.6$ , для сероуглерода  $\alpha = 6.9$ , для метана  $\alpha = 2$  и т.д. Следовательно, предельная смесь, имея недостаток горючего и избыток воздуха, обладает низкой теплотворной способностью, малой скоростью распространения пламени, низкой температурой взрыва и небольшим взрывным давлением. Сила взрыва при этом невелика.

Концентрация, соответствующая нижнему пределу взрыва, у насыщенных паров над жидкостью образуется всегда при температуре вспышки жидкости. При увеличении концентрации СО выше нижнего предела взрыва получают взрывчатые.

---

*Концентрация газа или пара, ниже которой происходит взрыв, а выше которой смесь не способна воспламеняться, называется верхним пределом взрыва (ВПВ).*

Область между нижним и верхним пределом взрыва называется **промежутком взрыва.**

Зная промежуток взрыва, можно определить области безопасных концентраций. Для оксида углерода эти области лежат в пределах  $(0 \div 12.5)\%$  и  $(75 \div 100)\%$ . Наличие областей безопасных концентраций позволяет в процессе хранения и применения горючих жидкостей поддерживать такой режим по температуре и давлению, чтобы концентрация паров была выше или ниже промежутка взрыва. Причиной прекращения распространения пламени на нижнем пределе и верхнем пределе взрыва являются теплопотери из пламени за счет излучения, которые зависят от температуры и состава смеси.

---

## Экспериментальное определение концентрационных пределов взрыва

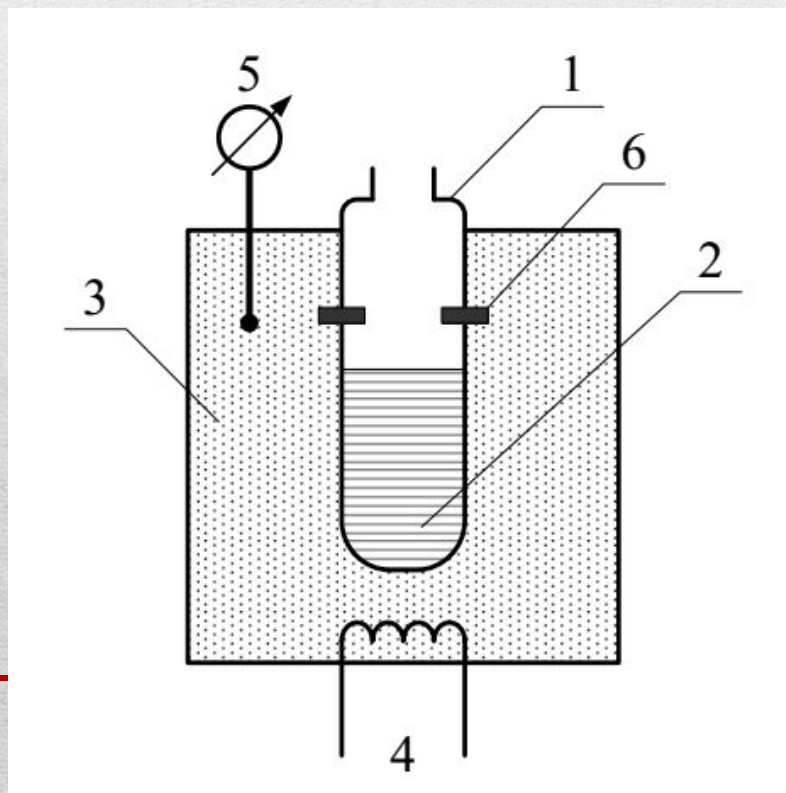
*Нижний температурный предел взрываемости обозначают температурой жидкости, при которой образуется концентрация паров, соответствующая нижнему пределу взрыва.*

*Аналогично – верхний температурный предел обозначают значением температуры, при котором концентрация паров соответствует верхнему пределу взрыва.*

Например, для метилового спирта нижний температурный предел взрываемости + 8 0С, а верхний + 32 0С. При всех температурах в диапазоне (8÷32)°С концентрации метилового спирта являются взрывчатыми.

Жидкость	Нижний предел взрыва, °С	Верхний предел взрыва, °С
Бутиловый спирт	+ 34.6	+ 62
Метиловый спирт	+ 8	+ 32
Скипидар	+ 36	+ 62
Бензол	- 13	+ 12

Схема прибора для измерения пределов взрыва приведена на рис. . Он состоит из взрывного сосуда (1), в который наливается горючая жидкость (2). Сосуд помещается в термостат (3) с нагревателем (4). Температура термостата и, соответственно, горючей жидкости измеряется датчиком (5). Через электроды (6) в сосуд может подаваться электрическая искра. Искру подают, изменяя температуру в термостате, и находят, таким образом, нижний и верхний пределы взрыва для данной жидкости. Если смесь взрывчатая, то появляется пламя, распространяющееся от контактов; если же она не взрывчатая, то пламя не появляется.



## Теоретическое определение концентрационных пределов взрыва

Для определения пределов взрыва применяются эмпирические формулы, полученные обработкой экспериментальных данных для различных горючих веществ.

Нижний предел взрыва (НПВ) рассчитывается по формуле:

$$\text{НПВ} = \frac{100}{4.76 \cdot (N - 1) + 1}, \text{ объем. \%}. \quad (18.5)$$

Верхний предел взрыва (ВПВ) рассчитывается по формуле:

$$\text{ВПВ} = \frac{4 \cdot 100}{4.76 \cdot N + 4}, \text{ объем. \%}. \quad (18.6)$$

Здесь  $N$  – количество атомов кислорода, необходимое для полного сгорания одной молекулы горючего компонента смеси.

---

Часто при решении вопросов безопасности вентиляционных установок, сушилок, мешалок и других аппаратов требуется определить пределы взрыва смеси, состоящей из нескольких горючих компонентов. Для нахождения нижнего и верхнего предела взрыва таких смесей используются следующие формулы:

$$\text{НПВ} = \frac{100}{\frac{V_1}{H_1} + \frac{V_2}{H_2} + \dots + \frac{V_n}{H_n}}, \text{ объем.}\%; \quad (18.7)$$

$$\text{ВПВ} = \frac{100}{\frac{V_1}{B_1} + \frac{V_2}{B_2} + \dots + \frac{V_n}{B_n}}, \text{ объем.}\%. \quad (18.8)$$

Здесь  $V_1, V_2, \dots, V_n$  – концентрации горючих компонентов, объем.%;

$H_1, H_2, \dots, H_n$  – нижние пределы взрыва входящих в смесь компонентов, объем.%;

$B_1, B_2, \dots, B_n$  – верхние пределы взрыва, входящих в смесь компонентов, объем.%;

При этом

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = 100\%.$$

При расчете пределов взрыва смеси, выраженных в массовых долях горючих компонентов (масс.%), значения объемных % ( $V_1, V_2, \dots, V_n$ ) в формулах (18.7), (18.8) заменяются на значения их массовых (весовых) процентов  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . При этом

$$z_1 + z_2 + \dots + z_n = 100\%.$$

Значения пределов взрыва смесей нескольких горючих компонентов с воздухом находятся между значениями пределов взрыва отдельных горючих компонентов, входящих в смесь.

---

## Расчет температуры и давления взрыва

Для каждой горючей смеси газов существуют две теоретические температуры взрыва – при постоянном давлении  $T_p$  и постоянном объеме  $T_V$ , причем всегда  $T_p < T_V$ . Это связано с тем, что удельная теплоемкость при постоянном давлении больше удельной теплоемкости при постоянном объеме ( $c_p > c_V$ ). Температура  $T_p$  соответствует взрыву на открытом воздухе, а  $T_V$  – взрыву в замкнутом объеме или помещении. Расчет температур взрыва  $T_p$  и  $T_V$  базируется на уравнениях теплового баланса:

$$Q = T_p (V_1 \cdot c_{p1} + V_2 \cdot c_{p2} + \dots + V_n \cdot c_{pn}); \quad (18.9)$$

$$Q = T_V (V_1 \cdot c_{V1} + V_2 \cdot c_{V2} + \dots + V_n \cdot c_{Vn}). \quad (18.10)$$

Здесь  $Q$  – теплота горения вещества;

$c_{p_i}$ ,  $c_{V_i}$ ,  $V_i$  – удельные теплоемкости и объемные доли компонентов, входящих в продукты взрыва.



Значения теоретической температуры взрыва рассчитываются с помощью уравнений теплового баланса (18.9), (18.10):

$$T_p = \frac{Q}{\sum_{i=1}^n V_i c_{p_i}}; \quad T_V = \frac{Q}{\sum_{i=1}^n V_i c_{V_i}}.$$

Разность между теоретической и действительной температурой взрыва значительно меньше, чем соответствующая разность между температурами горения. Это связано с тем, что при взрыве процесс протекает при условиях, близких к адиабатическим. При этом, ввиду того, что процесс взрыва протекает чрезвычайно быстро, потери теплоты в окружающую среду чрезвычайно малы.

Давление при взрыве смеси горючих газов с воздухом в замкнутом объеме зависит от температуры взрыва и отношения числа молекул продуктов горения к числу молекул во взрывчатой смеси. При взрыве газовых смесей избыточное давление обычно не превышает 1 МПа. При замене воздуха во взрывчатой смеси на кислород, давление при взрыве резко увеличивается за счет увеличения температуры горения. Это связано с тем, что значительное количество теплоты затрачивается на нагрев инертного

газа – азота, входящего в состав воздуха. При замене воздуха на кислород, давление взрыва для большинства горючих веществ увеличивается от 1 МПа до (1.5÷2) МПа.

Для расчета давления взрыва используется формула

$$p_v = p_0 \frac{T_v}{T_0} \cdot \frac{m}{n}, \quad (18.11)$$

где  $T_0$  – начальная температура смеси, К;

$T_v$  – температура взрыва, К (в зависимости от условий взрыва в качестве температуры взрыва используются либо  $T_p$  либо  $T_V$ );

$p_0$  и  $p_v$  – начальное давление среды и давление при взрыве, МПа;

$m$  – число молекул в химической формуле исходной взрывчатой смеси;

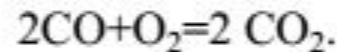
$n$  – число молекул в химической формуле продуктов взрыва.

---

В качестве примера определим давление при взрыве окиси углерода на открытом воздухе при следующих условиях:

$$p_0=0.1 \text{ МПа}; \quad T_0=293 \text{ К (или } +20^\circ\text{C)}; \quad T_g=T_p=2416 \text{ К.}$$

- Найдем значения  $m$  и  $n$  в соответствии с протекающей реакцией:



При этом  $m=3$ ,  $n=2$ , так как взрывчатая смесь содержит две молекулы CO и одну молекулу кислорода, а продукты взрыва содержат две молекулы CO<sub>2</sub>.

- Определим давление взрыва по формуле (18.11):

$$p_g = 0.1 \cdot \frac{2416}{293} \cdot \frac{3}{2} = 1.237 \text{ МПа}.$$

Таким образом, при взрыве смеси воздуха с угарным газом на открытом воздухе развивается давление  $p_g = 1.24 \text{ МПа}$ .



