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

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.

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

где p – давление на фронте ударной волны;

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

Величина Δp зависит от типа взрывчатого вещества, массы взорванного заряда, расстояния от центра взрыва и характера подстилающей поверхности.

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

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{2KMT_Э}}, \qquad (18.2)$$

где R – расстояние от центра взрыва, м;

M – масса заряда, кг;

K – коэффициент, учитывающий характер подстилающей поверхности;

$T_Э$ – тротиловый эквивалент взрывчатого вещества.

Таблица 16.1

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

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

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

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

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

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

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

Используя рассчитанные значения избыточного давления взрыва Δp, 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	Δp, 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 Δp.

Таблица 18.3

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

Δp, кПа	Степень разрушения	Δp, кПа	Степень разрушения	Δp, 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 получаются 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÷12.5)% и (75÷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

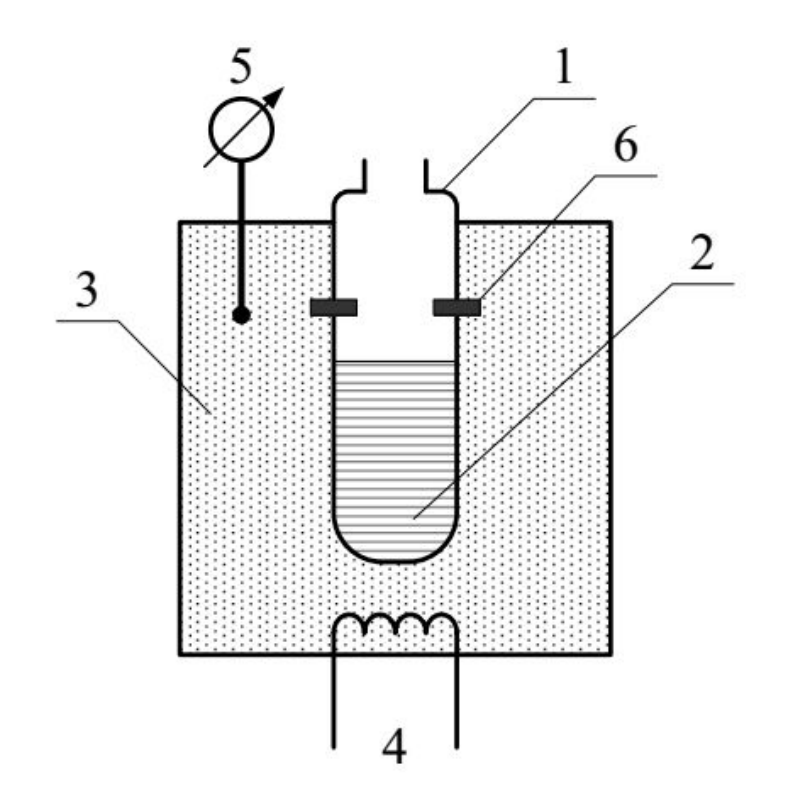
Нижний температурный предел взрываемости обозначают температурой жидкости, при которой образуется концентрация паров, соответствующая нижнему пределу взрыва.

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, ^{0}С	Верхний предел взрыва, ^{0}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:

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

Верхний предел взрыва (ВПВ) рассчитывается по формуле:

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

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:

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

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

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

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

B_1, B_2, ... B_n – верхние пределы взрыва, входящих в смесь компонентов, объем.%.

При этом

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

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

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

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:

$$Q = T_p(V_1 \cdot c_{p_1} + V_2 \cdot c_{p_2} + \ldots + V_n \cdot c_{p_n}); \qquad (18.9)$$

$$Q = T_V(V_1 \cdot c_{V_1} + V_2 \cdot c_{V_2} + \ldots + V_n \cdot c_{V_n}). \qquad (18.10)$$

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):

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

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

$$p_в = p_0 \frac{T_в}{T_0} \cdot \frac{m}{n}, \qquad (18.11)$$

где T_0 – начальная температура смеси, К;

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

p_0 и $p_в$ – 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 воздухом при следующих условиях:

$$p_0=0.1 \text{ МПа}; \qquad T_0=293 \text{ К (или } +20°\text{C)}; \qquad T_в=T_p=2416 \text{ К}.$$

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

$$2CO+O_2=2\,CO_2.$$

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_2.

- Определим давление взрыва по формуле (18.11):

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

Таким образом, при взрыве смеси воздуха с угарным газом на открытом воздухе развивается давление $p_в = 1.24$ МПа.