

# **ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ВЫЗВАННЫЕ ВЗРЫВАМИ**

**Взрывы  
технологических систем  
под давлением**

Технологическое оборудование, содержащее под давлением сжатые и сжиженные газы, широко применяется в промышленности и быту. Сжиженные газы можно хранить как в теплоизолированных («изотермических») сосудах и резервуарах при отрицательных температурах (аммиак, метан, кислород, азот и т.п.), так и под давлением в однослойных сосудах и резервуарах при температуре окружающей среды.

При разгерметизации сосуда последнего типа в энергию взрыва  $E$ , кДж/кг, переходит не только химическая энергия горючего газа, но и потенциальная энергия сжатого газа:

$$E = Q_{\text{вг}} + \frac{P_1 - P_0}{\rho_{\text{г}}(k - 1)},$$

где  $Q_{\text{вг}}$  — энергия взрыва взрывоопасного газа, кДж/кг;

$P_1$ ,  $P_0$  — давление газа в сосуде и окружающей среды соответственно, кПа;

$\rho_{\text{г}}$  — плотность газа при давлении  $P_1$ , кг/м<sup>3</sup>;

$k$  — показатель адиабаты.

# Таблица 3. Характеристики взрываемости некоторых газов

Вещество	M, кг/кмоль	Q <sub>вг</sub> , кДж/кг	Q <sub>встх</sub> , кДж/кг	Предел взрываемости С (НКПР/ВКПР)		ρ <sub>стх</sub> , кг/м <sup>3</sup>	С <sub>стх</sub> <sup>'</sup> , об. %
				%	кг/м <sup>3</sup>		
Аммиак NH <sub>3</sub>	15	16 600	2 370	15/18	0,11/0,28	1,18	19,72
Ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58	28600	3112	2,2/13,0	0,05/0,31	1,21	4,99
Ацетилен C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26	48 300	3 387	2/81	0,02/0,86	1,278	7,75
Бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	45 800	2 776	1,9/9,1	0,05/0,22	1,328	3,13
Бутадиен C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56	47000	2 892	2,0/11,5	0,04/0,26	1,329	3,38
Бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78	40600	2973	1,4/7,1	0,05/0,23	1,35	2,84
Бензин	94	46 200	2 973	1,2/7,0	0,04/0,22	1,35	2,1
Водород H <sub>2</sub>	2	120000	3 425	4/75	0,003/0,060	0,933	29,59
Метан CH <sub>4</sub>	16	50000	2 763	5/15	0,03/0,10	1,232	9,45
Монооксид углерода CO	28	13 000	2 930	12,5/74,0	0,14/0,85	1,28	29,59
Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	46 000	2 801	2,1/9,5	0,038/0,180	1,315	4,03
Этилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28	47200	2 922	3/32	0,034/0,370	1,28	4,46 <sub>3</sub>

*Примечание.*

НКПР — нижний концентрационный предел распространения пламени;

ВКПР — верхний концентрационный предел распространения пламени;

$Q_{встх}$  — энергия взрыва стехиометрической газовоздушной смеси;

$\rho_{стх}$  — плотность взрывоопасной стехиометрической смеси;

$C_{стх}$  — концентрация смеси с воздухом; об. % — объемные проценты.

**Таблица 4. Значения показателя адиабаты некоторых газов**

Газ, среда	$k = c_p / c_v$	Газ, среда	$k = c_p / c_v$
Воздух, водород,	1,4	Ацетилен	1,24
окись углерода,			
кислород		Хлор	1,36
Метан, углекислый газ	1,3	Сернистый газ	1,29
Пары воды	1,135	Сероводород	1,34
Аргон, гелий	1,67		

$c_p$ ,  $c_v$  — теплоемкости газа (пара) при постоянном давлении и объеме соответственно.

В энергию ударной волны  $E_{у.в}$ , кДж/кг, переходит только (40...60)% общей энергии взрыва:

$$E_{у.в} = (0,4 \dots 0,6) E,$$

а оставшаяся энергия расходуется на образование и разлет осколков:

$$E_{оск} = (0,6 \dots 0,4) E. \quad (10)$$

Величину тротилового эквивалента взрыва сосуда под давлением определяем по (8) принимая за величину тротилового эквивалента взрыва  $E_{у.в}$  взрывающей в рассматриваемом случае вид

$$m_{\text{ТРИТ}} = \frac{E_{у.в}}{Q_{\text{ТРИТ}}} m_r. \quad (11)$$

За расчетную массу газа  $m_r$ , кг, в этом случае принимают 50% массовой вместимости резервуара при одиночном хранении и 90% — при групповом.

Зная величину тротилового эквивалента, по формуле (8) несложно определить величину избыточного давления на фронте ударной волны  $\Delta P$

Образовавшиеся осколки разлетаются со скоростью  $w$ , м/с, определяемой по формуле Г. И. Покровского:

$$w = w_0 \exp(-R/\gamma l_{\text{оск}}),$$

где  $w_0$  — начальная скорость разлета обломков, м/с;

$$w_0 = \sqrt{2E_{\text{оск}} m_{\text{г}} / m_{\text{об}}}.$$

Здесь  $m_{\text{г}}$  и  $m_{\text{об}}$  — массы газа и оболочки сосуда соответственно, кг;  
 $R$  — расстояние разлета осколков, меньшее, чем  $R^*$ , т.е. максимального расстояния, на которое разлетаются осколки, м;

$$R^* = 2w_0 \sqrt{H/g},$$

где  $H$  — высота центра взрыва, м;

$g$  — ускорение поля тяготения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\gamma$  — коэффициент, равный отношению плотностей материала оболочки и воздуха соответственно,  $\gamma = \rho_{\text{об}}/\rho_{\text{воз}}$ ;  $l_{\text{оск}}$  — характерный размер осколка, имеющего форму цилиндра диаметром  $d_{\text{оск}}$  и длиной

$h_{\text{оск}}$ , м,  $l_{\text{оск}} =$

$$\sqrt{d_{\text{оск}}^2 + h_{\text{оск}}^2}$$

Для приближенных расчетов можно принять, что все осколки имеют цилиндрическую форму с длиной  $h_{\text{оск}}$ , равной толщине оболочки сосуда  $\delta_{\text{об}}$ , и диаметром  $d_{\text{оск}}$ , м:

$$d_{\text{оск}} = \frac{r_{\text{об}} \sigma_{\text{об}}}{w_0 \sqrt{E_y \rho_{\text{об}}}},$$

где  $r_{\text{об}}$  — радиус оболочки сосуда, м;

$\sigma_{\text{об}}$ ,  $E_y$  и  $\rho_{\text{об}}$  — предельное динамическое сопротивление разрушению, модуль упругости и плотность материала оболочки сосуда соответственно.

**Таблица 5. Механические свойства некоторых материалов**

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma$ , ГПа	$E_y$ , ГПа
Чугун	7100	0,18	130
Сталь	7 800	0,30...0,47	208
Алюминиевый сплав	2 780	0,44	71
Бетон	2 500	0,2	—

Масса одного осколка, кг,

$$m_{\text{оск}} = 0,25\rho_{\text{об}}\pi d_{\text{оск}}^2 h_{\text{оск}},$$

а число образующихся осколков

$$n = m_{\text{об}}/m_{\text{оск}}.$$

Оценка поражающего действия осколка на человека, с 50%-й вероятностью наносящего сильные ранения, производится по величине предельной скорости удара, м/с, определяемой по формуле

$$w_{50} = 1247\sqrt{S/m_{\text{оск}}} + 22,$$

где  $S$  — миделево сечение осколка массой  $m_{\text{оск}}$ , м<sup>2</sup>,  $S = 0,25\pi d_{\text{оск}}^2$ .

Осколок способен поразить человека («убойный осколок»), если его кинетическая энергия  $E_{кин} = 0,5 m_{оск} w^2$  превышает 100 Дж.

Способность осколков вызвать воспламенение жидкого топлива оценивается по удельному импульсу  $I = m_{оск} w/S$ .  
При  $I \leq 160$  Дж/(м<sup>2</sup>\*с) вероятность зажигания жидкого топлива равна 0%;  
 $I=900$  - 50%;  
 $I=2\ 500$  - 100%.

## Пример

При взрыве шарового стального резервуара внутренним диаметром  $d_{об} = 6$  м и толщиной стенки  $\delta_{об} = 3$  см, заполненного метаном, 60% энергии взрыва было израсходовано на образование ударной волны и 40% — на образование и разлет осколков.

Давление газа в сосуде  $P_1 = 8 * 10^2$  кПа, энергия взрыва метана  $Q_v = 50 * 10^3$  кДж/кг.

Определить степень поражения персонала и разрушения здания цеха с легким металлическим каркасом, находящегося на расстоянии  $R = 50$  м от эпицентра взрыва.

1. Найдем энергию взрыва резервуара с метаном по формуле (9), кДж/кг:

$$E = 50 \cdot 10^3 + \frac{(8 - 1) \cdot 10^2}{5,7(1,3 - 1)} = 50,409 \cdot 10^3,$$

где плотность метана при давлении  $P_1$  определяется по формуле, кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_{\text{мет}} = \frac{M_{\text{мет}}}{V_0} \frac{P_1}{P_0} = \frac{16}{22,4} \frac{8 \cdot 10^2}{1 \cdot 10^2} = 5,7.$$

Здесь  $M_{\text{мет}}$  — молекулярная масса метана,  $M_{\text{мет}} = 16$  кг/кмоль (см. таблицу 3);

$V_0$  — объем, занимаемый одним киломолем газа, м<sup>3</sup>/кмоль,  $V_0 = 22,4$ .

Значение показателя адиабаты метана  $\kappa = 1,3$  заимствовано из таблицы 4.

2. В энергию ударной волны переходит

$$E_{ув} = 0,6 * 50,409 * 10^3 = 30,245 * 10^3 \text{ кДж/кг},$$

а на образование и разлет осколков [см. формулу (10)]

$$E_{ос} = 0,4 * 50,409 * 10^3 = 20,164 * 10^3 \text{ кДж/кг}.$$

3. Величину тротилового эквивалента взрыва метана определим по формуле (11), кг:

$$m_{\text{ТЭГ}} = (30\,245 / 4\,520) * 322,2 = 2\,155,96,$$

где  $m_2 = 0,5\rho_{\text{мет}}\pi d_{\text{об}}^3/6 = 0,5 * 5,7 * (3,14 * (6)^3/6) = 322,2$  кг  
— расчетная масса участвующего во взрыве метана (50% массовой вместимости резервуара при одиночном хранении).

4. По формуле (8) найдем величину избыточного давления на фронте ударной волны на расстоянии  $R = 50$  м от эпицентра взрыва, кПа:

$$\Delta P_{\phi} = 95 \frac{2155,96^{1/3}}{50} + 390 \frac{2155,96^{2/3}}{50^2} + 1300 \frac{2155,96}{50^3} = 72,97.$$

5. По данным таблицы «Давление  $\Delta P_{\phi}$ , кПа, соответствующее степени разрушения», при таком избыточном давлении во фронте ударной волны на расстоянии  $R = 50$  м от эпицентра взрыва здание цеха будет полностью разрушено.

Согласно таблице 2 из находившегося в здании персонала 100% пострадают, из которых 30% погибнут.

6. Определим начальную скорость разлета осколков по формуле (12), м/с:

$$w_0 = \sqrt{2 * 20164 * (322,2 / 6612,8)} = 44,38$$

Масса стальной оболочки:

$$m_{об} = 0,25 * \pi * (2r_{об})^2 * \delta_{об} \rho_{об} = 0,25 * 3,14 * (2 * 3)^2 * 3 * 10^{-2} * 7800 = 6612,8 \text{ кг.}$$

7. По формуле (13) с учетом данных табл. 5 найдем диаметр осколка, см:

$$d_{оск} = (3 * 0,4 * 10^6) / (44,38 * \sqrt{208 * 10^6 * 7800}) = 0,02$$

Длину осколка можно принять равной толщине оболочки  $l_{оск} = \delta_{об} = 3 * 10^{-2}$  м = 3 см.

8. Скорость осколка на расстоянии  $R = 50$  м от эпицентра взрыва найдем по формуле (12), м/с:

$$w = 44,38 \exp(-50 / [(7800/1,29) * \sqrt{(0,02 * 10^{-2})^2 + (3 * 10^{-2})^2}]) = 35,44$$

9. Вычислим массу осколка по формуле (14), г:

$$m_{\text{оск}} = 0,25 * 7800 * 3,14 * (0,02 * 10^{-2})^2 * 3 * 10^{-2} = 0,08$$

Кинетическая энергия такого осколка на расстоянии  $R = 50$  м

$$E_{\text{кин}} = 0,5 * 0,08 * 35,44^2 = 51,9 < 100 \text{ Дж}$$

т.е. такой осколок не может убить человека.

# ЗАДАНИЕ

При взрыве резервуара внутренним радиусом  $r_{об}$  \_\_\_\_\_ м, длиной  $L$  \_\_\_\_\_ м и толщиной стенки  $\delta_{об}$ , заполненного \_\_\_\_\_ 50% энергии взрыва было израсходовано на образование ударной волны и 50% – на образование и разлет осколков. Давление газа в резервуаре  $P_1$  кПа.

Определить степень поражения персонала и разрушения здания цеха с легким металлическим каркасом, находящегося на расстоянии  $R$  \_\_\_\_\_ м от эпицентра взрыва.

Какова толщина металлической (стальной) преграды  $\delta_{прег}$  с 50%-й вероятностью пробиваемой осколками?

На каком расстоянии осколки способны поразить человека?

№ варианта	Вещество	P, кПа * 10 <sup>2</sup>	Q <sub>v</sub> , кДж/кг	Параметры резервуара					R, м
				Материал	Форма	r <sub>об</sub> , м	L, м	δ <sub>об</sub> , см	
1	Аммиак	12	16 600	Сталь	Цилиндр	3	5	3	20
2	Ацетилен	13	28600	Сталь	Сфера	4	6	4	25
3	Бутан	14	45 800	Чугун	Сфера	5	7	5	30
4	Бутадиен	15	47 000	Алюминий	Цилиндр	4	8	6	35
5	Водород	16	120000	Сталь	Сфера	7	9	7	40
6	Метан	17	50000	Чугун	Сфера	8	10	8	45
7	Пропан	18	46 000	Сталь	Цилиндр	3	5	9	50
8	Этилен	19	47 200	Сталь	Сфера	3	6	10	60
9	Аммиак	10	16 600	Чугун	Цилиндр	3	7	15	70
10	Ацетилен	12	28 600	Алюминий	Сфера	4	8	3	20
11	Бутан	13	45 800	Сталь	Сфера	5	9	4	25
12	Бутадиен	14	47 000	Чугун	Цилиндр	4	10	5	30
13	Водород	15	120000	Сталь	Сфера	5	5	6	35
14	Метан	16	50000	Сталь	Сфера	5	6	7	40
15	Пропан	17	46 000	Чугун	Цилиндр	6	7	8	45
16	Этилен	18	47 200	Алюминий	Сфера	7	8	9	50
17	Аммиак	19	16 600	Сталь	Сфера	8	9	10	60
18	Ацетилен	10	28 600	Чугун	Сфера	9	10	15	70
19	Бутан	11	45 800	Сталь	Сфера	10	5	15	75
20	Бутадиен	12	47 000	Сталь	Сфера	5	6	16	80
21	Водород	13	120000	Чугун	Сфера	6	7	17	85
22	Метан	14	50000	Алюминий	Цилиндр	4	8	19	90
23	Пропан	15	46 000	Сталь	Сфера	7	9	20	95
24	Этилен	16	47 200	Чугун	Сфера	8	10	20	100
25	Аммиак	17	16 600	Сталь	Цилиндр	6	16	20	120