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:

$$E = Q_{vг} + \frac{P_1 - P_0}{\rho_г (k - 1)},$$

где $Q_{vг}$ — энергия взрыва взрывоопасного газа, кДж/кг;

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

$\rho_г$ — плотность газа при давлении P_1, кг/м^3;

k — показатель адиабаты.

Таблица 3. Характеристики взрываемости некоторых газов

Вещество	M, кг/кмоль	$Q_{vг}$, кДж/кг	$Q_{vстх}$, кДж/кг	Предел взрываемости С (НКПР/ВКПР)		$\rho_{стх}$ кг/м^3	$C_{стх}$, об. %
				%	кг/м^3		
Аммиак NH_3	15	16 600	2 370	15/18	0,11/0,28	1,18	19,72
Ацетон c_3H_6O	58	28600	3112	2,2/13,0	0,05/0,31	1,21	4,99
Ацетилен C_2H_2	26	48 300	3 387	2/81	0,02/0,86	1,278	7,75
Бутан C_4H_{10}	58	45 800	2 776	1,9/9,1	0,05/0,22	1,328	3,13
Бутадиен C_4H_8	56	47000	2 892	2,0/11,5	0,04/0,26	1,329	3,38
Бензол C_6H_6	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_2	2	120000	3 425	4/75	0,003/0,060	0,933	29,59
Метан CH_4	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_3H_8	44	46 000	2 801	2,1/9,5	0,038/0,180	1,315	4,03
Этилен C_2H_4	28	47200	2 922	3/32	0,034/0,370	1,28	4,46

Примечание.
НКПР — нижний концентрационный предел распространения пламени;
ВКПР — верхний концентрационный предел распространения пламени;
$Q_{v стх}$ — 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, окись углерода, кислород	1,4	Ацетилен	1,24
		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:

$$E_{у.в} = (0{,}4 \ldots 0{,}6)E,$$

а остальная энергия расходуется на образование и разлет осколков:

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

Величину тротилового эквивалента взрыва сосуда под давлением определяем по (нимающей в рассматриваемом случае вид

$$m_{тнт} = \frac{E_{у.в}}{Q_{тнт}} m_г. \quad (11)$$

За расчетную массу газа $m_г$, 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 ΔP.

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

$$w = w_0 \exp(-R/\gamma l_{оск}),$$

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

$$w_0 = \sqrt{2E_{оск}\, m_г / m_{об}}.$$

Здесь $m_г$ и $m_{об}$ — 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^2;
γ — коэффициент, равный отношению плотностей материала оболочки и воздуха соответственно, $\gamma = \rho_{об}/\rho_{воз}$; $l_{оск}$ — характерный размер осколка, имеющего форму цилиндра диаметром $d_{оск}$ и длиной $h_{оск}$, м, $l_{оск}$ = $\sqrt{d_{оск}^2 + h_{оск}^2}$

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

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

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

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

Таблица 5. Механические свойства некоторых материалов

Материал	ρ, кг/м^3	σ, ГПа	$E_у$, 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,

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

а число образующихся осколков

$$n = m_{об}/m_{оск}.$$

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

$$w_{50} = 1\,247S/m_{оск} + 22,$$

где S — миделево сечение осколка массой $m_{оск}$, м^2, $S = 0{,}25\pi d^2_{оск}$.

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^2*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^3,

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

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

V_0 — объем, занимаемый одним киломолем газа, м^3/кмоль, V_0 = 22,4.

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

2. В энергию ударной волны переходит

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

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

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

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

$$m_{тнт} = (30\,245/4\,520) \cdot 322{,}2 = 2\,155{,}96,$$

где $m_г$ = 0,5$\rho_{мет}\pi d^3_{об}$/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:

$$\Delta P_{ф} = 95\frac{2\,155,96^{1/3}}{50} + 390\frac{2\,155,96^{2/3}}{50^{2}} + 1\,300\frac{2\,155,96}{50^{3}} = 72,97.$$

5. По данным таблицы «Давление $\Delta P_{ф}$, 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:

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

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

Кинетическая энергия такого осколка на расстоянии R = 50 м

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

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 * 10^2	Q_v, кДж/кг	Параметры резервуара					R, м
				Материал	Форма	$r_{об}$, м	L, м	$\delta_{об}$, 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