

### 19.3. Расчет зон ЧС при авариях на опасных производственных объектах

#### 19.3.1. Расчет зоны ЧС при взрыве конденсированных взрывчатых веществ (ВВ)

Расчет зоны ЧС сводится к определению ее размеров, степени поражения людей и разрушения объектов.

Конденсированные ВВ имеют плотность от  $1,30 \cdot 10^3$  до  $4,43 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и содержат в своем составе количество кислорода, достаточное для осуществления взрывной реакции. Различают индивидуальные ВВ и их смеси (табл. 6.1.1).

Таблица 19.1

Основные свойства конденсированных ВВ

Взрывчатое вещество	Удельная теплота взрыва $Q_m$ , кДж/кг	Удельный тротиловый эквивалент $\alpha$ , кг	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность энерговыведения $\rho_e$ , Дж/м <sup>3</sup>	Скорость детонации $V_d$ , км/с	Давление детонации $P_d$	$\rho_e/P_d$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Индивидуальные</b>							
Тринитротолуолтротил (ТНТ)	4520	1,0	1,60	7,232	6,73	21,0	0,344
Гексоген	5360	1,185	1,65	8,844	8,70	34,0	0,260
Октоген	5680	1,256	1,90	10,792	9,11	38,7	0,279
Нитроглицерин (только в смеси)	6700	1,481	1,59	10,653	-	-	-
Тетрил	4520	1,0	1,73	7,82	7,85	26,0	0,301
Гремучая ртуть – инициированное ВВ	1790	0,395	4,43	7,93	5,40	-	-
<b>Смеси</b>							
Амматол	2650	0,586	1,60	4,24	5,20	-	-
Торпекс	7540	1,67	-	-	-	-	-
Нитроглицериновый динамит 60%-ный	2710	0,6	-	-	-	-	-
Пластическое ВВ	4520	1	-	-	-	-	-

Главной характеристикой ВВ является теплота взрыва ( $Q_m$ ) - количество энергии, выделяемое при взрыве 1 кг ВВ, кДж/кг.

Взрывы конденсированных ВВ протекают в режиме детонации.

Расчет зоны ЧС при взрыве КВВ производится в следующей последовательности.

1. Избыточное давление при взрыве заряда ВВ на поверхности земли определяется по формуле М. А. Садовского

$$\Delta P_\phi = 95 \frac{\sqrt[3]{G}}{R} + 390 \frac{\sqrt[3]{G^2}}{R^2} + 1300 \frac{G}{R^3}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_\phi$  - избыточное давление, кПа;

$G$  - масса тротилового заряда, кг;

$R$  - расстояние от центра взрыва до объекта, м.

*Примечание.* 1. Формула (1) справедлива для наземного взрыва и воздушного при  $R > 8H$ .  $H$  - высота взрыва, м. 2. Для взрыва любого ВВ (кроме тротила)  $G$  определяют по формуле:  $G = \alpha M_{\text{вв}}$ ,  $\alpha$  - удельный тротиловый эквивалент;  $M_{\text{вв}}$  - масса взрывчатого вещества. Величину  $G$  называют также тротиловым эквивалентом.

Зона ЧС при взрывах ограничивается  $\Delta P_\phi < 10$  кПа.

Разрешая формулу (1) относительно  $R$  и представляя ее в виде  $R = f(\Delta P_\phi, G)$  получим соотношение

$$R = x \cdot \sqrt[3]{G},$$

где  $x$  - параметр уровня поражения (без учета влияния подстилающей поверхности):  $x = 4,7$  ( $\Delta P_\phi = 50$  кПа) - полные разрушения;  $x = 6,4$  ( $\Delta P_\phi = 30$  кПа) - сильные разрушения;  $x = 8,2$  ( $\Delta P_\phi = 20$  кПа) - средние разрушения;  $x = 13,5$  ( $\Delta P_\phi = 10$  кПа) - слабые разрушения.

2. Степень поражения объекта экономики (ОЭ) определяется по формуле

$$D = \frac{S_{зчс}}{S_{оэ}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $S_{зчс}$  - площадь зоны ЧС, км<sup>2</sup>;

$S_{оэ}$  - площадь объекта экономики, км<sup>2</sup>.

Восстановление объекта экономики целесообразно, если слабые и средние разрушения зданий и сооружений не превышают 40%, а сильных и полных разрушений нет.

3. По табл. 19.2 определяем степень поражения ударной волной незащищенных людей.

Таблица 19.2

Степень поражения людей

$\Delta P_\phi$ , кПа	Степень поражения
>100	Смертельные (безвозвратные)
60-100	Тяжелые поражения (контузии)
40-60	Средние поражения (кровотечения, вывихи, сотрясения мозга)
10-40	Легкие поражения (ушибы, потеря слуха)
<10	Безопасное расстояние

4. Число безвозвратных потерь при взрывах в населенных пунктах (городах) можно оценить по формуле

$$N_{без} = P \cdot G^{0,666}, \quad (3)$$

где  $N_{без}$  - число безвозвратных потерь, чел.;

$P$  - плотность населения или промышленного объекта, тыс. чел/км<sup>2</sup>;

$G$  - тротиловый эквивалент, т.

Санитарные потери определяются по формуле

$$N_{сан} = 3 \div 4 \cdot N_{без}.$$

5. По табл. 19.3 определяется степень разрушения элементов инженерно-технического комплекса (ИТК).

**Слабые разрушения** - повреждения или разрушения крыш и оконных и дверных проемов. Ущерб - 10-15% от стоимости зданий.

**Средние разрушения** - разрушение крыш, окон, перегородок, чердачных перекрытий, верхних этажей. Ущерб - 30-40%.

**Сильные разрушения** - разрушения несущих конструкций и перекрытий. Ущерб - 50%. Ремонт нецелесообразен.

**Полное разрушение** - обрушение зданий.

Таблица 19.3

Степень разрушения объектов (зданий, сооружений, транспорта) в зависимости от избыточного давления ( $\Delta P_\phi$ , кПа)

Элементы ИТК	Степень разрушения		
	сильная	средняя	слабая
Цех с легким металлическим каркасом	50-30	30-20	20-10
Кирпичные здания	30-20	20-12	2-8
Цистерны ж/д	90-60	60-40	40-20
Грузовая машина	>50	50-40	40-й)
ЛЭП	120-80	80-50	50-20
Трубопроводы наземные	>130	130-50	50-20
» на эстакаде	50-40	40-30	30-20
Резервуары ГСМ:			
наземные	100-50	50-30	30-10
подземные	200-100	100-50	50-30
ТЭС	25-20	20-15	15-10

Водонапорная башня	60-40	40-20	20-10
Деревянные дома	30-20	20-10	<10

6. Для оперативных расчетов радиусов зон полных, сильных, средних, слабых разрушений (с учетом влияния подстилающей поверхности) можно использовать зависимости:

- радиус зоны полных разрушений  $R_{n.p}$ , м:

$$R_{n.p} = 3,1 \cdot \sqrt[3]{G}; \quad (4)$$

- радиус зоны сильных разрушений  $R_{с.р}$ , м:

$$R_{с.р} = 4,2 \cdot \sqrt[3]{G}; \quad (5)$$

- радиус зоны средних разрушений  $R_{ср.р}$ , м:

$$R_{ср.р} = 3,1 \cdot \sqrt[3]{G}; \quad (6)$$

- радиус зоны слабых разрушений  $R_{сл.р}$ , м:

$$R_{сл.р} = 8,3 \cdot \sqrt[3]{G}. \quad (7)$$

При этом

$$G = 2 \cdot k \cdot \alpha \cdot M_{\text{вв}}, \quad (8)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий свойства подстилающей поверхности в районе взрыва (ж/б плита - 0,95, бетон - 0,85, плотный грунт - 0,7; средний грунт - 0,65);

$\alpha$  - удельный тротиловый эквивалент (табл. 19.1);  $M_{\text{вв}}$  - масса ВВ (ГВС), кг.

7. Возможные потери людей в зоне ЧС определяются как математическое ожидание (МО), равное сумме потерь персонала объекта в зависимости от степени его защищенности

$$MO = \sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i, \quad (9)$$

где  $N_i$  - количество людей в здании, чел;

$C_i$  - процент потерь (табл. 6.1.4);

$n$  - число зданий на объекте.

8. Расчет зоны ЧС при взрывах малой мощности ( $G < 10$  т) производится по формуле

$$R = \frac{x \cdot \sqrt[3]{G}}{\sqrt[3]{1 + \left(\frac{7000}{50kPa}\right)^2}}^{1/6}, \quad (10)$$

$$x = \begin{cases} 4,7 \left( \Delta P_{\phi} = 50kPa \right) & \text{- для полных разрушений} \\ 6,4 \left( \Delta P_{\phi} = 30kPa \right) & \text{- для средних разрушений} \\ 13,5 \left( \Delta P_{\phi} = 10kPa \right) & \text{- для слабых разрушений} \end{cases}$$

$G$  —

тротиловый

эквивалент, кг.

Таблица 19.4

Потери рабочих и служащих на ОЭ(%)

Степень разрушения зданий, сооружений	Степень защищенности персонала					
	Не защищен		В зданиях		В защитных сооружениях	
	Общие	Санитарные	Общие	Санитарные	Общие	Санитарные
Слабая	8	3	1,2	0,4	0,3	0,1
Средняя	12	9	3,5	1,0	1,0	0,3
Сильная	80	25	30	2,5	2,5	0,8
Полная	100	30	40	7,0	7,0	2,5

9. Основные мероприятия по защите населения:

- оказать первую медицинскую помощь;
- при крайней необходимости эвакуировать.

**Задание.** На цементном заводе (приложение 1) произошел диверсионный взрыв гексогена массой  $(50+2n)$  т; октогена массой  $(100+3n)$  т, где  $n$  - номер студента по журналу. Грунт в районе ЦЗ и города - плотный. На  $R = 100$  м от ЦЗ расположены жилые кварталы с многоэтажными зданиями:  $(1200+20n)$  чел;

(1000+50n) чел. На заводе работает (850+10n) чел. Плотность населения в городе 3 тыс. чел/км<sup>2</sup>. Место взрыва студент выбирает самостоятельно.

Определить степень опасности для ЦЗ и города при взрыве КВВ:

1. Провести зонирование ЦЗ по  $\Delta P_\phi$ , выделив зоны полных, сильных, средних и слабых разрушений.
2. Рассчитать потери персонала.
3. Вычислить площадь зоны ЧС

$$S_{\text{зчс}} = \pi \cdot R_{\text{зчс}}^2,$$

где  $R_{\text{зчс}}$  - радиус зоны слабых разрушений ( $\Delta P_\phi \approx 10$  кПа).

4. Определить степень разрушения ЦЗ

$$D = \frac{S_{\text{зчс}}}{S_{\text{ог}}} \cdot 100\%.$$

5. Рассчитать и представить в табличной форме и на плане условными знаками степени разрушений элементов НТК.
6. Составить графические зависимости радиусов зон полных, сильных, средних, слабых разрушений от Мощности взрыва для двух КВВ.
7. Найти количество КВВ, при взрыве которого ЦЗ может быть восстановлен.

### 19.3.2. Расчет зоны ЧС при взрыве емкости, находящейся под давлением газа (пара)

Взрыв емкостей, находящихся под давлением относится к группе физических взрывов, при которых разрушение емкости сопровождается быстрым расширением газа и образованием ударной волны и поля осколков. Наиболее частые причины - падение резервуара, разрывы швов.

1. Энергия взрыва определяется по формуле  $E$ , Дж:

$$E = \frac{P_r \cdot V_0}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_r} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right], \quad (1)$$

где  $P_r$  - давление газа в емкости, Па;

$P_0$  - атмосферное давление, Па;

$V_0$  - объем емкости, м<sup>3</sup>;

$\gamma$  - значения показателя адиабаты (табл. 19.5).

Таблица 19.5

Значения показателя адиабаты некоторых газов

Газ, среда	$\gamma = C_p / C_v$	Газ, среда	$\gamma = C_p / C_v$
Воздух, водород, оксид углерода, азот, кислород	1,4	Ацетилен	1,24
Метан, углекислый газ	1,3	Хлор	1,36
Пары воды	1,135	Сернистый газ	1,29
Аргон, гелий	1,67	Сероводород	1,34

2. Определяем (с учетом соотношения  $E_{\text{гд.с}} = 0,6E$  массу эквивалентного заряда  $G$ , кг):

$$G = \frac{0,6 \cdot E}{Q_{\text{гнт}}} \quad (2)$$

3. Избыточное давление во фронте ударной волны на расстоянии  $R$  определяется по формуле М.А.Садовского

$$\Delta P_\phi = 95 \frac{\sqrt[3]{G}}{R} + 390 \frac{\sqrt[3]{G^2}}{R^2} + 1300 \frac{G}{R^3}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_\phi$  - избыточное давление, кПа;

$G$  - масса тротилового заряда (тротильный эквивалент), кг;

$R$  - расстояние от центра взрыва до объекта, м.

4. Сравнивая полученные значения  $\Delta P_\phi$  с табличными, находим поражающее действие ударной волны.
5. Расчет поля осколков производится аналогично расчетам при взрывах ГВС, ТВС, ЛВС по следующим формулам:

$$L_{\text{max}} = \frac{V_0^2}{g}, \quad L_x = 238 \cdot \sqrt[3]{G}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} M_0 \cdot V_0^2 = E_{оск} = 0,2 \cdot E, (0,2 = 0,5 \cdot 0,4). \quad (5)$$

Масса цилиндрического резервуара  $M_u$

$$M_u = \pi \cdot \rho \cdot h \cdot (r^2 - r_1^2) + 2\pi \cdot r_1^2 \cdot \rho \cdot \delta. \quad (6)$$

Масса шарового резервуара  $M_{ш}$

$$M_{ш} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r^3 - r_1^3) \cdot \rho. \quad (7)$$

Объемы соответственно равны

$$M_u = \pi \cdot r_1^2 (h - 2\delta); \quad V_{ш} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_1^3, \quad (8)$$

где  $\rho$  - плотность железа (металла),  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>;

$\delta$  - толщина оболочки, см;

$r$  и  $r_1$  - внешний и внутренний радиусы резервуара, см;

$h$  - длина цилиндрического резервуара, см.

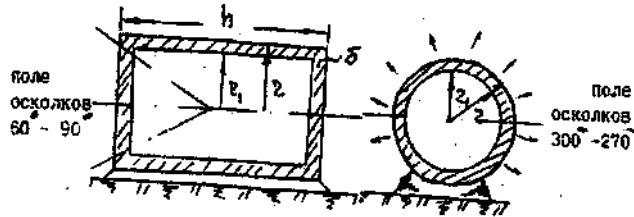


Рис. 8.1. Схема сечений цилиндрического и шарового резервуаров для расчета их объемов

**Пример.** Определить степень разрушения деревянных, многэтажных кирпичных зданий и поражение людей на  $R = 100$  м при взрыве варочного котла на ЦБК  $V = 320$  м<sup>3</sup>,  $P_r = 22 \cdot 10^5$  Па,  $P_0 = 10^5$  Па,  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup> - плотность железа, размеры котла  $h = 11,3$  м,  $r = 3$  м,  $\delta = 2$  см,  $\gamma = 1,135$ .

**Решение:**

1. Определяем энергию взрыва котла

$$E = \frac{P_r \cdot V_0}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_r} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] = \frac{22 \cdot 10^5 \cdot 320}{1,135 - 1} \left[ 1 - \left( \frac{10^5}{22 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1,135 - 1}{1,135}} \right] = 16,2 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

2. Рассчитываем массу эквивалентного заряда:

$$G = \frac{0,6 \cdot E}{Q_{гнт}} = \frac{0,6 \cdot 16,2 \cdot 10^8 \text{ Дж}}{4,52 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}} = 216 \text{ кг}$$

3. Вычисляем избыточное давление во фронте ударной волны на расстоянии  $R = 100$  м

$$\Delta P_\phi = 95 \frac{\sqrt[3]{216}}{100} + 390 \frac{\sqrt[3]{216^2}}{100^2} + 1300 \frac{216}{100^3} = 7,4$$

Деревянные дома получают слабые разрушения, люди на открытой местности в безопасности.

4. Определяем дальность разлета осколков

$$L_x = 238 \cdot \sqrt[3]{G} = 238 \cdot \sqrt[3]{216} = 1428 \text{ м}$$

$$0,2 \cdot E = \frac{1}{2} M_0 \cdot V_0^2,$$

где  $0,2 \cdot E$  - энергия, идущая на разлет осколков.

Масса цилиндрического резервуара

$$M_u = \pi \cdot \rho \cdot h \cdot (r^2 - r_1^2) + 2\pi \cdot r_1^2 \cdot \rho \cdot \delta = 3,14 \cdot 7,8 \cdot 11,30 \cdot (300^2 - 298^2) + 2 \cdot 3,14 \cdot 298^2 \cdot 7,8 \cdot 2 = 41800 \text{ кг};$$

$$V_0^2 = \frac{0,2 \cdot E}{1/2 \cdot M_0} = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 16,2 \cdot 10^8}{41800} = 15500 \text{ м}^2/\text{с}^2;$$

$$L_{\max} = \frac{V_0^2}{g} = \frac{15500}{9,81} \approx 1580 \text{ (в безвоздушном пространстве).}$$

Выбираем радиус разлета осколков  $L_x < L_{\max} = 1428$  м.

Задание. Определить степень разрушения ЦЗ и поражения людей при взрыве варочного котла на котельной. Объем котла  $V = (300+n) \text{ м}^3$ ,  $\rho_{\text{жел}} = 7,8 \text{ г/см}^3$ ,  $P_r = 2500000 \text{ Па}$ ,  $P_0 = 10^5 \text{ Па}$ , размеры котла:  $h = (15+0,2n) \text{ м}$ ,  $\delta = (3,0+0,2n) \text{ м}$ ,  $\delta = (2+0,005n) \text{ см}$ ,  $\gamma = 1,35$ .

### 19.3.3. Расчет зоны ЧС при взрыве пылевоздушной смеси (ЛВС) в открытом пространстве и в помещении

Взрыв пыли возможен при концентрации пыли выше НКП (нижнего концентрационного предела). Взрывы пыли происходят при разгрузке железнодорожных платформ с каменным углем, торфом, загрузке элеваторов мукой, накоплении пыли при деревообработке. Возможность взрыва определяется размером частиц ( $d < 100 \text{ мкм}$ ) и наличием нижнего концентрационного предела воспламенения (взрываемости)

$$НКП = \frac{800}{Q_m}, \quad (1)$$

где  $Q_m$  - удельная теплота сгорания пыли, кДж/кг (табл. 6.3.1).

Таблица 19.6

#### Характеристики взрыва некоторых ПВС

Наименование пыли	$P_{\text{max}}$ , кПа	$Q_m$ , кДж/кг $\times 10^{-3}$	НКП, кг/м <sup>3</sup>
Антрацитовая	620	32-36	0,023
Торфяная	500	10,5	0,08
Печная (сажа)	480	15,7-28,4	0,04
Мучная	710	16,8	0,047
Древесная сосновая	620	15,4	0,053
» еловая	620	20,4	0,038
Сера	540	111	0,007
Сахар	640	80	0,01

Взрыв пыли в открытом пространстве (в воздухе) оценивается в следующем порядке:

1. Определяем тротильный эквивалент взрыва пыли по формуле

$$G = \frac{M \cdot Q_m}{Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (2)$$

где  $M$  - масса пыли, кг;

$z$  - коэффициент участия пыли во взрыве ( $z = 0,02 - 0,1$ );

$Q_m$  - удельная теплота сгорания пыли, кДж/кг;

$Q_{\text{ТНТ}}$  - удельная теплота сгорания тротила, кДж/кг.

2. Вычисляем избыточное давление во фронте ударной волны при взрыве пыли (по формуле М.А.Садовского)

$$\Delta P_\phi = 95 \frac{\sqrt[3]{G}}{R} + 390 \frac{\sqrt[3]{G^2}}{R^2} + 1300 \frac{G}{R^3}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_\phi$  - избыточное давление, кПа;  $G$  - эквивалентная масса (ТНТ), кг;

$R$  - расстояние от места взрыва, м.

3. Находим возможные поражения людей, степени разрушения зданий, сооружений, используя табл. 6.3.2, 6.3.3, 6.3.4.

Таблица 19.7

#### Степень поражения людей

$\Delta P_\phi$ , кПа	Степень поражения
>100	Смертельные (безвозвратные)
60-100	Тяжелые повреждения
40-60	Средние повреждения (кровотечение, вывихи, сотрясение мозга)
10-40	Легкие повреждения (ушибы, потеря слуха)
<10	Безопасное

Таблица 19.8

Степень разрушения объектов (зданий, сооружений, транспорта) в зависимости от избыточного давления  $\Delta P_\phi$ , кПа

Элементы НТК	Степень разрушения		
	сильная	средняя	слабая
Цех с металлическим каркасом	50-30	30-20	20-10

Кирпичные здания	30-20	20-12	12-8
Цистерны ж/д	90-60	60-40	40-20
Грузовая машина	>50	50-40	40-20
ЛЭП	120-80	70-50	40-20
Трубопроводы наземные	>130	130-50	50-20
» на эстакаде	50-40	40-30	30-20
Резервуары ГСМ наземные	100-50	50-30	30-10
» подземные	200-100	100-50	50-30
ТЭС	25-20	20-15	15-10
Водонапорная башня	60-40	40-20	20-10
Деревянные дома	30-20	20-10	10

Таблица 19.9

### Потери персонала ОЭ, %

Степень разрушения зданий	Степень защищенности персонала					
	Незащищен		В зданиях		ВЗС	
	Общие	Санитарные	Общие	Санитарные	Общие	Санитарные
Слабая	8	3	1,2	0,4	0,3	0,1
Средняя	12	9	3,5	1,0	1,0	0,3
Сильная	80	25	30	10	2,5	0,8
Полная	100	30	40	15	7,0	2,5

Наиболее мощный взрыв наблюдается при значениях НКП = 3-4 %.

Взрыв пыли в замкнутом пространстве (в помещении) оценивается в следующем порядке:

1. Определяем критическую массу пыли, при которой возможен взрыв

$$M_{кр} = НКП \cdot V_{св}, \quad (4)$$

где НКП — нижний концентрационный предел взрываемости, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{св}$  - свободный объем помещения, м<sup>3</sup>.

2. Вычисляем время накопления взрывоопасного количества пыли

$$t_{взв} = \frac{M_{кр}}{m_0}, \quad (5)$$

где  $t_{взв}$  - время накопления взрывоопасного количества пыли, сут;

$m_0$  - масса пыли, выделяемая за сутки, кг.

3. Рассчитываем избыточное давление  $\Delta P_\phi$  в помещении цеха при взрыве ПВС по формуле

$$\Delta P_\phi = \frac{zMQ_mP_0}{\rho V_{св}T_0C_p}, \quad (6)$$

где  $z$  - коэффициент участия пыли во взрыве (в помещении  $z = 0,5$ );

$M$  - масса пыли, кг;

$Q_m$  - удельная теплота взрыва пыли, кДж/кг;

$P_0$  - атмосферное давление, кПа;

$\rho$  - плотность воздуха до взрыва при  $T_0$ ,  $\rho = 1,22 \div 1,25$  кг/м<sup>3</sup>;

$V_{св}$  - свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;

$T_0$  - температура воздуха в помещении до взрыва, К°;

$C_p$  - теплоемкость воздуха,  $C_p = 1,01$  кДж/кг.

Для значений  $z = 0,5$  и  $t = 20$  °С формула (6.3.6) упрощается

$$\Delta P_\phi = 14,0 \cdot \frac{MQ_m}{V_{св}T_0}. \quad (7)$$

4. Радиус разброса ПВС в помещении  $R_0$ , м, рассчитывается по соотношению

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_0}{2\pi}}. \quad (8)$$

*Примечание:* 1. Взрыв в помещении возможен только при значении фактической плотности вещества в воздухе больше НКП ( $\rho_\phi > НКП$ ).



2. Если при взрыве в помещении  $\Delta P_{\phi} > 30$  кПа, то помещение, как правило, разрушается (частично или полностью).
3. Свободный объем помещения составляет 80% от общего объема  $V_0$ .
4. Наиболее мощный взрыв пыли может наблюдаться при значениях НКП = 3 - 4.

**Задание.** На расстоянии  $R$  от цементного завода находится деревообрабатывающий комбинат (ДОК). В открытом цехе деревообработки образовалось  $M$ , т, пыли. В закрытом цехе производства ДСП объемом  $V_0 = 5000$  м<sup>3</sup> при работающей вытяжке в сутки накапливается  $m$ , г, еловой пыли.

Определить:

1. Возможные последствия взрыва пыли при возникновении искры в цехе деревообработки.
2. Время накопления взрывоопасной концентрации пыли и последствия ее взрыва в цехе ДСП при  $t = 20$  С.
3. Построить и сравнить зависимости изменения избыточного давления от расстояния при взрыве пыли в открытом пространстве и в помещении.
4. Сделать выводы по оценке обстановки на ЦЗ при взрывах на ДОКе.

### 19.3.4. Расчет зоны ЧС при взрыве газовоздушных, топливовоздушных (ГВС, ТВС) смесей в открытом пространстве

Характерными особенностями взрывов ГВС, ТВС являются:

1. Возникновение разных типов взрывов: детонационного, дефлаграционного или комбинированного. Комбинированный взрыв наиболее распространен.
2. При взрывах образуется пять зон поражения: бризантная (детонационная), действия продуктов взрыва (огненного шара), действия ударной волны, теплового поражения и токсического задымления.
3. Зависимость мощности взрыва от параметров среды, в которой происходит взрыв (температура, скорость ветра, плотность застройки, рельеф местности).
4. Для реализации комбинированного или детонационного взрыва для ГВС и ТВС обязательным условием является создание концентрации продукта в воздухе в пределах нижнего и верхнего концентрационного предела (НКП, ВКП).

*Примечание.* Дефлаграция - взрывное горение с дозвуковой скоростью. Детонация - процесс взрывчатого превращения вещества со сверхзвуковой скоростью.

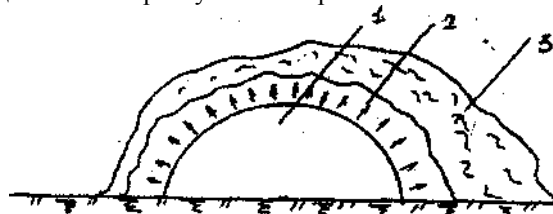


Рис. 10.1. Схема взрыва ГВС, ТВС: 1 - фронт детонационной волны; 2 - огненный шар; 3 - облако дыма

Определяем параметры поражающих факторов зон ЧС.

1. Зона бризантного действия (I зона):

Радиус зоны бризантного действия взрыва  $R_1$ , м:

$$R_1 = 1,75 \cdot \sqrt[3]{M}, \quad (1)$$

где  $M$  - масса ГВС, ТВС в резервуаре, кг. За  $M$  принимается 50% вместимости резервуара при одиночном хранении и 90% - при групповом.

Избыточное давление во фронте ударной волны в пределах I зоны  $\Delta P_{\phi} = 1750$  кПа.

2. Зона огненного шара (II зона):

Радиус зоны действия продуктов взрыва - радиус огненного шара объемного взрыва  $R_{\text{огн}}$ :

$$R_{\text{огн}} = R_2 = 1,7 \cdot R_1. \quad (2)$$

Избыточное давление в зоне разлета продуктов взрыва (на границе огненного шара) определяется по формуле

$$\Delta P_{\phi} = 1300 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^3 + 50. \quad (3)$$

3. Зона действия ударной волны (III зона):

Избыточное давление в зоне действия воздушной ударной волны ( $R_3 = 1,7 \cdot R_1$ ) вычисляем по формуле

$$\Delta P_{\phi} = \frac{233}{\sqrt{1 + 0,41 \left( R_3 / R_1 \right)^3} - 1}. \quad (4)$$



Радиусы зон полных ( $\Delta P_\phi = 50$  кПа), сильных ( $\Delta P_\phi = 30$  кПа), средних ( $\Delta P_\phi = 20$  кПа), слабых ( $\Delta P_\phi = 10$  кПа) разрушений находим по зависимости

$$R_3 = R_1 \sqrt[3]{\frac{(233/\Delta P_\phi + 1)^2 - 1}{0,41}}. \quad (5)$$

Интенсивность теплового излучения взрыва ГВС, ТВС на расстоянии  $R_3$  рассчитываем по зависимости

$$J = Q_0 \cdot F \cdot T, \quad (6)$$

где  $J$  - интенсивность излучения, кДж/м<sup>2</sup>с;  $Q_0$  - удельная теплота пожара, кДж/м<sup>2</sup>с;  $T$  - прозрачность воздуха

$$T = 1 - 0,058 \cdot \ln R_3;$$

$F$  - угловой коэффициент, характеризующий взаимное расположение источника и объекта

$$F = \frac{R_2^2 R_3}{\sqrt{(R_2^2 + R_3^2)^3}}.$$

Продолжительность существования огненного шара  $t_{св}$ , с, определяем по формуле

$$t = (0,45 \div 0,85) \sqrt[3]{M}, \quad (7)$$

где  $M$  - масса ГВС (ТВС), кг.

Тепловой импульс  $U$ , кДж/м<sup>2</sup>, находим по формуле

$$U = I \cdot t_{св}. \quad (8)$$

4. Рассчитываем безвозвратные потери людей от воздействия ударной волны

$$N_{см} = 3 \cdot P \cdot M^{0,666}, \quad (9)$$

где  $M$  - масса ГВС (ТВС), т;

$P$  - плотность населения, тыс. чел/км<sup>2</sup>.

5. Определяем поражающее действие ударной волны и теплового импульса, сравнивая вычисленные значения  $\Delta P_\phi$  и  $U$  с табличными.

6. Выбираем основные мероприятия по защите:

- заглубление, обваловка емкостей с газами, топливом;
- установка противопожарных стен, перегородок и т.д.;
- расположение складов за пределами зон ЧС ( $\Delta P_\phi < 10$  кПа,  $U < 100$  кДж/м<sup>2</sup>);
- соблюдение правил пожаро- и взрывобезопасности.

### 19.3.5. Взрывы ГВС и ТВС в помещении

В помещениях взрывоопасных объектов (цеха деревообработки, лакокраски, складах топлива, котельных, элеваторах, печных трубах) возможны взрывы и взрывное дефлаграционное горение, т.е. горение с дозвуковой скоростью распространения пламени при повышении давления во всем объеме, поскольку границы помещения не дают возможности расширяться продуктам горения.

1. Избыточное давление взрыва для индивидуальных горючих веществ, состоящих из атомов С, Н, N, Cl, Br, I, р определяется по формуле

$$\Delta P_{\max} = (P_{\max} - P_0) \frac{100M \cdot z}{c_{см} \cdot V_{св} \cdot \rho_{n(z)} \cdot \varphi}, \quad (1)$$

где  $P_{\max}$  - максимальное давление взрыва стехиометрической ГВС, ТВС в замкнутом объеме, определяется по формуле или по справочникам. Если данные отсутствуют, то  $P_{\max} \approx 900$  кПа;  $P_0$  - начальное давление в помещении, кПа (принимают  $P_0 = 101$  кПа);  $M$  - масса ГВС, выделившаяся в помещении в результате аварии, кг;  $z$  - коэффициент участия горючего вещества во взрыве в помещении, равный: 0,5 - для горючих газов, промышленной пыли; 0,3 - для ЛВЖ и горючих жидкостей, нагретых до температуры вспышки и выше и при температуре ниже температуры вспышки при образовании аэрозоля;

$V_{св}$  - свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;

$\rho_{n(z)}$  - плотность пара (газа) при  $P_0$ , кг/м<sup>3</sup>, определяемая по формуле

$$\rho_{n(z)} = \frac{12,15 \cdot M_B}{t_B + 273},$$

где  $M_B$  - молярная масса вещества;  $t_B$  - температура воздуха в помещении, °С;  $\varphi$  - коэффициент негерметичности помещения и неадиабатичности процесса горения, равный 3;

$c_{см}$  - стехиометрическая концентрация газов или паров, определяемая по формуле

$$c_{смх} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta}$$

где  $\beta$  - стехиометрический коэффициент кислорода в уравнении реакции горения, равный

$$\beta = n_c + \frac{n_H - n_G}{4} - \frac{n_O}{2}$$

( $n_c, n_H, n_G, n_O$  - число атомов С, Н, О и галогенов в молекуле горючего).

*Примечание.* Стехиометрической смесью называют оптимальный состав, в котором количество компонентов соответствует формуле химической реакции горения.

В реальных условиях для оперативных расчетов целесообразно использовать соотношение

$$\Delta P_{\max} = \frac{z \cdot M \cdot Q_m \cdot P_0}{\varphi \cdot \rho \cdot V_{св} \cdot T_0 \cdot C_p}, \quad (2)$$

где  $T_0$  - температура воздуха в помещении до взрыва, К;

$Q_m$  - удельная теплота взрыва ГВС, ПГВС, кДж/кг (табл. 19.10);

$C_p$  - теплоемкость воздуха,  $C_p = 1,01$  кДж/кг. К;

$\rho_0$  - плотность воздуха до взрыва при  $T_0$ , кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_0 = 1,20 \div 1,25$  кг/м<sup>3</sup>);

$\varphi$  - коэффициент негерметичности помещения и неадиабатичности процесса горения, равный 2-3. Для горючих газов с  $z = 0,5$  и  $t = 20$  °С формула (6.5.2) упрощается

$$\Delta P_{\max} = 14,0 \cdot \frac{M \cdot Q_m}{V_{св} \cdot T_0}. \quad (3)$$

Таблица 19.10

Характеристики некоторых ГВС и ТВС

Вещество	Формула	$Q_m$ кДж/кг $\times 10^{-3}$	Пределы взрываемости	
			НКП/ВКП, %	НКП/ВКП, кг/м <sup>3</sup>
Аммиак	NH <sub>3</sub>	16,6	15,0/18,0	0,11/0,28
Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	28,6	2,2/13,0	0,052/0,31
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	48,3	2,0/81,0	0,021/0,86
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	40,6	1,4/7,1	0,045/0,23
Бензин	Смесь паров	46,2	1,2/7,0	0,04/0,22
Водород	H <sub>2</sub>	120	4,0/75,0	0,0033/0,062
Метан	CH <sub>4</sub>	50	5,0/15,0	0,033/0,1
Метиловый спирт	CH <sub>3</sub> OH	20,9	5,0/34,7	0,092/0,47
Оксид углерода	CO	13	12,05/74,0	0,14/0,85
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	46,4	2,1/9,5	0,038/0,18
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	47,2	3,0/32,0	0,034/0,37
Этиловый спирт	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	33,8	3,6/19,0	0,068/0,34

2. Радиус разброса ГВС, ТВС, ПВС в помещении  $R_0$ , м, рассчитывается по соотношению

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_0}{2\pi}}. \quad (4)$$

*Пример.* Определить максимальное и избыточное давления в помещении при взрыве ГВС, состоящей из метана (CH<sub>4</sub>).  $Q_m = 50 \cdot 10^6$  Дж/кг, свободный объем помещения  $V_{св} = 2000$  м<sup>3</sup>, масса метана 10 кг,  $t = 20$  °С.

**Решение:**

1. Максимальное давление взрыва принимаем  $P_{\max} = 900$  кПа.

2. Определяем плотность метано-воздушной смеси:

$$\rho_{\Gamma} = 12,15 \frac{M_B}{t_B + 273} = 12,15 \frac{16}{20 + 273} = 0,7 \text{ кг/м}^3.$$

3. Вычисляем стехиометрическую концентрацию газа

$$c_{смх} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 2} = 10\%$$

4. Находим избыточное давление в помещении после взрыва ГВС метана

$$\Delta P_{\max} = (900 - 101) \cdot \frac{100 \cdot 10 \cdot 0,5}{2000 \cdot 10 \cdot 0,7 \cdot 3} = 9,51 \text{ кПа}.$$

5. Радиус разброса смеси продуктов взрыва в цехе

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_0}{2\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 2000}{2 \cdot 3,14}} \approx 9,85 \text{ м}$$

Выводы. В помещении в результате взрыва ГВС разрушится остекление, возможны поражения людей (механические травмы) осколками стекол.

### 19.3.6. Расчет поля давления и осколков после разрушения здания

При взрыве в помещении ТВС, ГВС и ПВС возможно разрушение здания, образования воздушной ударной волны и поля осколков. Энергия взрыва рассчитывается по соотношению

$$E = E_{\text{ув}} + E_{\text{оск}}, \quad (1)$$

где  $E$  - энергия взрыва в помещении, равная

$$E = Z \cdot M \cdot Q_m, \text{ кДж};$$

$Z$  - коэффициент участия газа вещества во взрыве:

$$Z = 0,5 \text{ для газа, пыли; } Z = 0,3 \text{ для ЛВЖ};$$

$E_{\text{ув}}$  - энергия, идущая на образование ударной волны,

$$E_{\text{ув}} = 0,6 \cdot E \text{ кДж};$$

$M$  - масса горючего вещества, выделившегося в помещении в результате аварии, кг;

$Q_m$  - удельная теплота взрыва газа, пыли, кДж/кг;

$E_{\text{оск}}$  - энергия, идущая на разлет осколков

$$E_{\text{оск}} = 0,4 \cdot E, \text{ Дж.}$$

Расчет производится в следующей последовательности.

1. Рассчитываем минимальную критическую массу горючего вещества для реализации взрыва в помещении, кг

$$M_{\text{кр}} = НКП \cdot V_{\text{св}}, \quad (2)$$

где  $НКП$  - нижний концентрационный предел взрываемости, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{св}}$  - свободный объем помещения, м<sup>3</sup>.

2. Находим превышение давления при взрыве в помещении  $\Delta P$ , кПа:

$$\Delta P = \frac{Z \cdot M \cdot Q_m \cdot P_0}{\phi \cdot \rho_g \cdot V_{\text{св}} \cdot T_0 \cdot C_p}. \quad (3)$$

3. Определяем последствия взрыва в помещении для здания.

4. Вычисляем избыточное давление во фронте ударной волны после разрушения здания

$$\Delta P_\phi = 95 \frac{\sqrt[3]{G}}{R} + 390 \frac{\sqrt[3]{G^2}}{R^2} + 1300 \frac{G}{R^3}, \quad (4)$$

где  $\Delta P_\phi$  - избыточное давление, кПа;

$G$  - тротиловый эквивалент взрыва, кг:

$$G = \frac{Z \cdot \beta_{\text{ув}} \cdot M_{\text{кр}} \cdot Q_m}{Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (5)$$

$Z$  - коэффициент участия горючего вещества во взрыве;

$\beta_{\text{ув}}$  - доля энергии, идущая на образование ударной волны

$$\beta_{\text{ув}} = 0,6;$$

$M_{\text{кр}}$  - критическая масса горючего вещества, кг;

$Q_m$  - удельная теплота взрыва горючего вещества, кДж/кг;

$Q_{\text{ТНТ}}$  - удельная теплота взрыва тротила, равная 4,52-10<sup>3</sup> кДж/кг.

5. Сравниваем  $\Delta P_\phi$  во фронте ударной волны с табличными и оцениваем поражающее действие на людей и сооружения.

6. Определяем дальность разлёта осколков,  $L_{\text{max}}$ , м:

$$L_{\text{max}} = \frac{V_0^2}{g}, \quad (6)$$

где  $V_0^2$  - начальная скорость полета осколков, м/с;

$g$  - ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

Скорость  $V_0$  вычисляется по соотношению

$$\frac{1}{2} M_0 \cdot V_0^2 = E_{оск} = Z \cdot \beta_{оск} \cdot M \cdot Q_m, \quad (7)$$

уравнение энергии взрыва,  
кинетической идущая на  
энергии разлет осколков

где  $M$  - масса горючего вещества, кг;

$Q_m$  - удельная теплота взрыва вещества, кДж/кг;

$\beta_{оск}$  - доля энергии, идущая на разлет осколков,  $\beta_{оск} = 0,4$ ,

$M_0$  - суммарная масса осколков, равная массе здания, резервуара, кг;

$$M_0 = (2L_{зд} \cdot H_{зд} + 2Ш_{зд} \cdot H_{зд}) P_{стен} (1-a) + (L_{зд} \cdot Ш_{зд}) P_{перек} (1-в),$$

где  $Ш_{зд}$  - ширина здания, м;

$L_{зд}$  - длина здания, м;

$H_{зд}$  - высота здания, м;

$P_{стен}$  - давление стен, кг/м<sup>2</sup>;

$P_{перек}$  - давление перекрытий, кг/м<sup>2</sup>;

$a$  - отношение площади оконных проемов к площади стен;

$в$  - отношение площади вентиляционных отверстий к площади перекрытий.

Откуда получаем

$$V_0^2 = \frac{2 \cdot Z \cdot \beta_{оск} \cdot M \cdot Q_m}{M_0}, \quad (8)$$

По формуле (6)  $L_{\max}$  имеет завышенное значение, так как это расчет полета осколков в безвоздушном пространстве. Поэтому дальность полета осколков ограничивают соотношением

$$L_{\max} \leq L_x \quad (9)$$

где  $L_x = 238 \cdot \sqrt[3]{G}$ , м;  $G$ , кг.

Если условие (6.6.9) выполняется, принимаем за дальность разлета осколков  $L_{\max}$ , если нет - то принимаем  $L_x$ .

**Пример.** Определить условия реализации и последствия взрывов ГВС и ТВС в помещениях. Котельная (поз. 14) работает на пропаново-бутановой смеси (процентное соотношение 1:1),  $V_0 = 50\,000 \text{ м}^3$  (50 х 50 х 20),

$Q_{мб} = 45,8 \cdot 10^3$  кДж/кг (для бутана  $C_4H_{10}$ ), НКП/ВКП = 0,045/0,22 кг/м<sup>3</sup>,  
 $Q_{м,р} = 46,4 \cdot 10^3$  кДж/кг (для пропана  $C_3H_8$ ), НКП/ВКП = 0,0385/0,18 кг/м<sup>3</sup>,  $P_{стен} = 500$  кг/м<sup>2</sup>,  $P_{перек} = 100$  кг/м<sup>2</sup>,  $a = 0,15$ ,  $в = 0,10$ .

Здание кирпичное одноэтажное.

**Решение:**

Определяем минимальную критическую массу горючего вещества для реализации взрыва в помещении

$$M_{кр} = \text{НКП} \cdot V_{св} = \text{НКП} \cdot 0,8 \cdot K_0 = 0,0415 \cdot 0,8 \cdot 50000 = 1660 \text{ кг}.$$

Находим превышение давления при взрыве в помещении

$$\Delta P = \frac{Z \cdot M \cdot Q_m \cdot P_0}{\varphi \cdot \rho_e \cdot V_{св} \cdot T_0 \cdot C_p} = \frac{0,5 \cdot 1660 \cdot 46,1 \cdot 10^3 \cdot 10^2}{2,5 \cdot 1,25 \cdot 40000 \cdot 1,01 \cdot 293} = 105,438 \text{ кПа}$$

Здание разрушается.

Троитиловый эквивалент взрыва

$$G = \frac{Z \cdot \beta_{ув} \cdot M_{кр} \cdot Q_m}{Q_{ТНТ}} = \frac{0,5 \cdot 1660 \cdot 46,1 \cdot 10^3}{4,52 \cdot 10^3} = 8465 \text{ кг}.$$

Энергия взрыва

$$E = Z \cdot M_{кр} \cdot Q_m = 0,5 \cdot 1660 \cdot 46,1 \cdot 10^3 = 38,263 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

Определяем долю энергии, идущую на разлет осколков здания

$$E_{оск} = 0,4 \cdot E = 15,31 \cdot 10^3 \text{ кДж}.$$

Составляем уравнения баланса энергии

$$\frac{M_0 \cdot V_0^2}{2} = E_{оск},$$

$$V_0^2 = \frac{2 \cdot E_{оск}}{M_0} = \frac{2 \cdot 15,31 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{1245000} = 24594,377 \text{ м}^2/\text{с}^2$$

$$V_0 = 156,8 \text{ м/с}.$$

Масса здания

$$M_0 = M_{стен} + M_{перекрытия} = 50 \cdot 20 \cdot 4 \cdot 0,85 \cdot 300 + 50 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 0,90 = 1020000 + 225000 = 1245000 \text{ кг.}$$

Дальность разлета осколков

$$L_{\max} = \frac{V_0^2}{g} = \frac{24594,377}{9,81} = 2507 \text{ м,}$$

$$L_x = 238 \cdot \sqrt[3]{0,4G} = 238 \cdot \sqrt[3]{0,4 \cdot 8465} = 238 \cdot \sqrt[3]{3386} = 3507 \text{ м.}$$

За окончательную дальность разлёта осколков принимаем  $L_{\max} \langle L_x, L_{окон} = 2500 \text{ м.}$

### 19.3.7. Оценка параметров аварийного взрыва газгольдера со сжатым газом и действия осколков по стальным мишеням

Исходные данные: форма газгольдера;

$r$  - радиус газгольдера, м;

$L$  - длина газгольдера, м;

$d$  - толщина оболочки газгольдера, мм;

$\Delta P$  - разрушающее давление, Па;

$\rho_1$  - плотность материала, из которого выполнен газгольдер, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  - высота над поверхностью земли, центр взрыва (геометрический центр газгольдера), м;

$Q_m$  - теплота взрыва газа, пара, кДж/кг;

$\gamma$  - показатель адиабаты газа;

$\sigma_2$  - динамический предел текучести, Па.

Оценка параметров аварийного взрыва газгольдера со сжатым газом производится в следующей последовательности:

1. Поверхность сферы газгольдера (в случае шара)  $S_{сф}$ , м<sup>2</sup>:

$$S_{сф} = 4 \cdot \pi \cdot r^2. \quad (1)$$

2. Объем газгольдера  $V$ , м<sup>3</sup>:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3. \quad (2)$$

3. Масса оболочки газгольдера  $m$ , кг:

$$m = S_{сф} \cdot d \cdot \rho_1. \quad (3)$$

4. Плотность газа при давлении  $P$   $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>:

$$P = \Delta P + P_0;$$
$$\rho = \rho_0 \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^{1/\gamma}. \quad (4)$$

5. Полная масса газа  $M$ , кг:

$$M = \rho \cdot V. \quad (5)$$

6. Отношение массы сжатого газа к массе металла оболочки  $\beta$ :

$$\beta = \frac{M}{m}. \quad (6)$$

7. Удельная энергия сжатого газа под давлением  $Q$ , Дж/кг:

$$Q = \frac{\Delta P}{\rho \cdot (\gamma - 1)}, \quad (7)$$

если газ взрывоопасный и находится под давлением, то

$$Q = Q_m + \frac{\Delta P}{\rho \cdot (\gamma - 1)}, \quad (8)$$

где  $Q_m$  - удельная теплота взрыва газа, Дж/кг.

8. Начальная скорость осколков  $V_0$  м/с:

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot Q \cdot \beta}. \quad (9)$$

9. Дальность полета осколков  $L$ , м:

$$L \approx 2 \cdot V_0 \cdot \sqrt{\frac{H}{g}}. \quad (10)$$

10. Троилловый эквивалент взрыва газгольдера  $G$ , кг:

$$G = \frac{Q \cdot M}{Q_{THT}}. \quad (11)$$

11. Энергия, идущая на ударную волну  $G_{yв}$ , кг:

$$G_{yв} = 0,6 \cdot 2 \cdot G, \quad (12)$$

где 0,6 - коэффициент, учитывающий долю энергии, идущую на ударную волну; 2 - коэффициент, учитывающий наземность взрыва.

12. Находим избыточное давление взрыва во фронте ударной волны  $\Delta P_\phi$  и импульс  $I$  на расстоянии  $R = 5; 10; 20; 30; 40; 50; 100; 150$  м по формулам:

$$\begin{aligned} I &= \Delta P_\phi \cdot \tau_+; \\ \tau_+ &= 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt[6]{G_{yв}} \cdot \sqrt{R}; \\ \Delta P_\phi &= 95 \frac{\sqrt[3]{G}}{R} + 390 \frac{\sqrt[3]{G^2}}{R^2} + 1300 \frac{G}{R^3}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $G_{yв}$  - тротиловый эквивалент взрыва для ударной волны, кг;

$R$  - расстояние от места взрыва, м;

$\tau_+$  - время сжатия ударной волны, с.

Составляем таблицу избыточного давления  $\Delta P_\phi$ , Па, и импульса  $I$ , от расстояния  $R$ , м.

Поражающее действие осколков по стальным преградам (мишеням) оценивается следующим образом:

1. Принимаем отношение диаметров осколков к толщине оболочки газгольдера

$$a = \frac{d_1}{d} = 1; 2; 5; 10. \quad (14)$$

2. Определяем характерный размер осколков  $l$ , м:

$$l = \sqrt{d_1^2 + d^2}. \quad (15)$$

3. Вычисляем отношение плотности материала оболочки газгольдера  $\rho_1$  к плотности воздуха  $\rho_B$ :

$$\bar{\gamma} = \frac{\rho_1}{\rho_B}. \quad (16)$$

4. Рассчитываем скорость встречи осколков с мишенью

$$V = V_0 \cdot \exp \left[ -R / \left( \bar{\gamma} \cdot l \right) \right]. \text{ м/с}; \quad (17)$$

5. Находим поверхность сферы газгольдера, м<sup>2</sup>:

$$S_{сф} = 4 \cdot \pi \cdot r^2. \quad (6.7.18)$$

6. Вычисляем среднюю площадь осколков  $S$ , м<sup>2</sup>:

$$S = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}. \quad (19)$$

7. Определяем число осколков при данном дроблении

$$n = \frac{S_{сф}}{S}. \quad (20)$$

8. Рассчитываем среднюю массу осколков  $m_{cp}$ , кг:

$$m_{cp} = \frac{m}{n}. \quad (21)$$

9. Определяем предельную толщину стальной преграды, пробиваемой осколками, с вероятностью 50 %

$$h^* = 0,138 \cdot d_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{V}{\sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}}, \quad (22)$$

где  $\sigma_2$  - динамический предел текучести преграды, Па;

$\rho_2$  - плотность преграды, кг/м<sup>3</sup>.

10. Для пробиваемых преград  $h_2 < h_x$  вычисляем остаточную скорость осколков на вылете  $V_{ост}$ , м/с:

$$V_{ост} = V \left( 1 - \frac{h_2}{h^*} \right). \quad (23)$$

*Пример.* Определить параметры аварийного взрыва сферического газгольдера. Радиус газгольдера  $r = 5,25$  м, толщина оболочки газгольдера  $d = 16$  мм, разрушающее давление  $\Delta P = 2,86 \cdot 10^6$  Па, плотность стали, из которой выполнен газгольдер  $\rho_1 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, высота над землей (центр газгольдера)  $H = 4$  м.

**Решение:**

1. Поверхность сферы газгольдера

$$S_{сф} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 5,25^2 = 346,5 \text{ м}^2.$$

2. Объем газгольдера

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 5,25^3 = 600,1 \text{ м}^3.$$

3. Масса оболочки газгольдера

$$m = S_{сф} \cdot d \cdot \rho_1 = 346,1 \cdot 0,016 \cdot 7800 = 43,2 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

4. Плотность газа при давлении  $P$

$$P = \Delta P + P_0 = 2,86 \cdot 10^6 + 10^5 = 2,96 \cdot 10^6 \text{ Па} = 2,96 \text{ МПа}$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^{1/\gamma} = 1,22 \cdot \left( \frac{2,96}{0,1} \right)^{1/1,4} = 13,72 \text{ кг/м}^3$$

5. Полная масса газа

$$M = \rho \cdot V = 13,75 \cdot 600,1 = 8,32 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

6. Отношение массы сжатого газа к массе металла оболочки

$$\beta = \frac{M}{m} = \frac{8,32 \cdot 10^3}{43,2 \cdot 10^3} = 0,193.$$

7. Удельная энергия газа под давлением

$$Q = \frac{\Delta P}{[\rho \cdot (\gamma - 1)]} = \frac{2,86 \cdot 10^6}{[13,72 \cdot (1,4 - 1)]} = 0,521 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$$

8. Начальная скорость осколков

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot Q \cdot \beta} = \sqrt{2 \cdot 0,521 \cdot 10^6 \cdot 0,193} = 448 \text{ м/с}.$$

9. Дальность полета (при  $H = 4$ )осколков

$$L \approx 2 \cdot V_0 \cdot \sqrt{\frac{H}{g}} = 2 \cdot 448 \cdot \sqrt{\frac{4}{9,81}} = 572 \text{ м}.$$

10. Тротильный эквивалент взрыва газгольдера

$$G = \frac{Q \cdot M}{Q_{ТНТ}} = \frac{0,521 \cdot 10^6 \cdot 8,32 \cdot 10^3}{4,52 \cdot 10^6} = 960 \text{ кг}.$$

11. Энергия, идущая на ударную волну

$$G_{ув} = 0,6 \cdot 2 \cdot G = 0,6 \cdot 2 \cdot 960 = 1151 \text{ кг}.$$

Определяем избыточное давление во фронте ударной волны на расстоянии 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 м и заносим в следующую таблицу:

$R, \text{м}$	5	10	20	30	40	50	100	150
$\Delta P_{ф}, \text{Па}$								
$I, \text{Па} \cdot \text{с}$								

Оценка поражающего действия осколков по стальным преградам (мишеням) на расстоянии 5 м от оболочки

1. Примем отношение диаметров осколков к толщине газгольдера

$$\frac{d_1}{d} = 1.$$

2. Характерный размер осколков

$$l = \sqrt{d_1^2 + d^2} = d\sqrt{2} = 0,0226 \text{ м}.$$

3. Отношение плотности материала к оболочке и воздуху

$$\bar{\gamma} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{7800}{1,22} = 6,39 \cdot 10^3.$$

4. Рассчитываем скорость встречи осколков с мишенью



$$V = V_0 \cdot \exp \left[ -R / \left( \gamma \cdot l \right) \right] = 448 \cdot \exp \left[ -5 / \left( 6,39 \cdot 10^3 \cdot 0,0226 \right) \right] = 432,7 \text{ м/с};$$

5. Поверхность сферы

$$S_{сф} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 5,25^2 = 346,4 \text{ м}^2$$

6. Средняя площадь осколков

$$S = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,016}{4} = 2,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

7. Определяем число осколков при данном дроблении

$$n = \frac{S_{сф}}{S} = \frac{346,4}{2,01 \cdot 10^{-4}} = 1,725 \cdot 10^6.$$

8. Рассчитываем среднюю массу осколков  $m_{cp}$ , кг:

$$m_0 = \frac{m}{n} = \frac{43,2 \cdot 10^3}{1,725 \cdot 10^6} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

9. Предельную толщину стальной преграды, пробиваемой осколками, с  $\rho_2 = 7800 \text{ кг/м}^3$  и  $\sigma_2 = 4,7 \cdot 10^8 \text{ Па}$  вероятностью 50 %

$$h^* = 0,138 \cdot d_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{V}{\sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}} = 0,138 \cdot 0,016 \cdot 7800 \cdot \frac{432,7}{\sqrt{4,7 \cdot 10^8 \cdot 7800}} = 3,9 \cdot 10^{-3}$$

10. Для пробиваемых преград  $h_2 < h_x$  вычисляем остаточную скорость осколков на вылете  $V_{ост}$ , м/с:

$$V_{ост} = V \left( 1 - \frac{h_2}{h^*} \right).$$

Например, для преграды 3 мм

$$V_{ост} = 432,7 \left( 1 - \frac{3}{3,9} \right) = 99,9 \text{ м/с}$$

**Задание.** Оценить параметры аварийного взрыва газгольдера со сжатым газом и действие осколков по стальным мишеням.

Исходные данные:

1. Газгольдер сферический
2.  $r = (5 + 0,1n) \text{ м}$  - радиус газгольдера;
3.  $d = (10 + 0,001n) \text{ мм}$  - толщина оболочки;
4.  $\Delta P = (2,5 + 0,01n) \cdot 10^6 \text{ Па}$  - разрушающее давление;
5.  $\rho_1$  - плотность стали, из которой выполнен газгольдер  
 $\rho_1 = 7800 \text{ кг/м}^3$ ;
6.  $H = (3 + 0,02n) \text{ м}$  - высота газгольдера над поверхностью земли, м;
7.  $\gamma = 1,135$  - показатель адиабаты;
8.  $\sigma_2 = 4,7 \cdot 10^8 \text{ Па}$  - динамический предел текучести.