

## Прогнозирование и оценка последствий аварийных взрывов топливовоздушных смесей (ТВС)

Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (далее - Методика) позволяет провести приближенную оценку различных параметров воздушных ударных волн и определить вероятные степени поражения людей и повреждений зданий при авариях со взрывами топливно-воздушных смесей.

Методика рекомендуется для использования:

- при определении масштабов последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей;
- при разработке и экспертизе деклараций безопасности опасных производственных объектов;
- при прогнозировании вероятности степени поражения людей и степени повреждения зданий от взрывной нагрузки при авариях ТВС;
- при оценке поражающего действия и последствий аварийных взрывов ТВС.

Для количественной оценки параметров воздушных ударных волн при взрывах ТВС рекомендуется рассматривать частичную разгерметизацию и полное разрушение оборудования, содержащего горючее вещество в газообразной или жидкой фазе, выброс этого вещества в окружающую среду, образование облака ТВС, инициирование ТВС, взрывное превращение (горение или детонация) в облаке ТВС.

Исходными данными для расчета параметров ударных волн при взрыве облака ТВС являются:

- характеристики горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС;
- агрегатное состояние ТВС (газовое или гетерогенное);
- средняя концентрация горючего вещества в смеси  $c_r$ ;
- стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом  $c_{ст}$ ;
- масса горючего вещества, содержащегося в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва,  $M_r$ ;
- удельная теплота сгорания горючего вещества  $q_r$ ;
- информация об окружающем пространстве.

Практическая часть

1. Определить скорости распространения фронта племени.
2. Рассчитать эффективный энергетический запас топливовоздушной смеси.
3. Рассчитать расстояние при взрыве.
4. Рассчитать давление при взрыве.
5. Расчет аварии, связанный с образованием «огненного шара».

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТВС

### Определение эффективного энергозапаса ТВС

1. Эффективный энергозапас горючей смеси определяется по соотношению:

$$E = M_r q_r \text{ при } c_r \leq c_{ст},$$

или

$$E = M_r q_r \frac{c_{ст}}{c_r} \text{ при } c_r > c_{ст}.$$

где  $q_r$  – удельная теплота сгорания горючего вещества;  $c_{ст}$  – стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом;  $c_r$  – средняя концентрация горючего вещества в смеси.

При расчете параметров взрыва облака ТВС, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается.

Стехиометрическая концентрация горючего вещества в ТВС определяется из справочных данных или рассчитывается отдельно.

Теплота сгорания горючего газа  $q_f$  в ТВС берется из справочных данных или оценивается по формуле  $q_f = 44\beta$  МДж/кг.

Корректировочный параметр  $\beta$  для наиболее распространенных в промышленном производстве опасных веществ определяется по таблице № 1.

### Определение ожидаемого режима взрывного превращения

ТВС, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своим взрывоопасным свойствам разделены на четыре класса. Классификация горючих веществ по степени чувствительности приведена в таблице № 1.

Для оценки параметров действия взрыва возможные режимы взрывного превращения ТВС разбиваются на шесть диапазонов по скоростям их распространения, причем пять из них приходятся на процессы дефлаграционного горения ТВС, поскольку характеристики процесса горения со скоростями фронта, меньшими 500 м/с, имеют существенные качественные различия.

2. Ниже приводятся режимы взрывного превращения ТВС по диапазонам скоростей.

Диапазон 1. Детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с и больше.

Диапазон 2. Дефлаграция, скорость фронта пламени 300—500 м/с.

Диапазон 3. Дефлаграция, скорость фронта пламени 200—300 м/с.

Диапазон 4. Дефлаграция, скорость фронта пламени 150—200 м/с.

Диапазон 5. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением

$$V_f = k_1 M_r^{1/6},$$

где  $k_1$  – константа, равная 43;  $M_r$  – масса горючего вещества в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва.

Диапазон 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением

$$V_f = k_2 M_r^{1/6},$$

где  $k_2$  – константа, равная 26.

3. Для дальнейших расчетов необходимо оценить агрегатное состояние топлива в смеси. Предполагается, что смесь гетерогенная, если более 50% топлива содержится в облаке в виде капель, иначе ТВС считается газовой. Провести такие оценки можно исходя из величины давления насыщенных паров топлива при данной температуре и времени формирования облака. Для летучих веществ, таких как пропан, при температуре 20°C смесь можно считать газовой.

4. Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии  $R$  от центра облака при детонации облака ТВС предварительно рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние по соотношению:

$$R_x = r / (E/P_0)^{1/3},$$

где  $P_0 = 101325$  Па.

5. Безразмерное давление  $P_x$  определяется по соотношению:

$$P_x = (V_f/C_0)^2 ((\sigma - 1)/\sigma) (0,83/R_x - 0,14/R_x^2).$$

Для газовых смесей  $\sigma$  принимается равной 7, для гетерогенных - равной 4.

6. Безразмерный импульс сжатия фазы  $I_{x1}$  определяется по соотношению:

$$I_x = (V_f/C_0) ((\sigma - 1)/\sigma)$$

$$\cdot (1 - 0,4 \cdot (V_f/C_0) \cdot ((\sigma - 1)/\sigma)) \left( 0,06/R_x + 0,01/R_x^2 - 0,0025/R_x^3 \right).$$

Выражения для  $P_x$  и  $I_x$  справедливы для значений,  $R_x$  больших величины  $R_{кр} = 0,34$ , иначе вместо в соотношения для  $P_x$  и  $I_x$  подставляется величина  $R_{кр}$ .

7. После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия вычисляются соответствующие им размерные величины:

$$\Delta P = P_x P_0,$$

$$I = I_x (P_0)^{2/3} \frac{E^{1/3}}{C_0}.$$

## ОЦЕНКА ПОРАЖАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

При взрывах ТВС существенную роль играют такие поражающие факторы, как длительность действия ударной волны и связанный с ней параметр импульс взрыва. Реальное деление плоскости факторов поражения на Р-И-диаграмме для оценки уровня разрушения промышленных зданий («импульс — давление») на рисунке 3 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности на две части (внутри — область разрушения, вне — область устойчивости) не имеет четкой границы. При приближении параметров волны к границе опасной области вероятность заданного уровня поражения нарастает от 0 до 100 %. При превышении известного уровня величин амплитуды давления и импульса достигается 100 %-ная вероятность поражения. Эти типичные особенности диаграмм поражения необходимо учитывать при отражении представления вероятности достижения того или иного уровня ущерба с помощью пробит-функции  $Pr_i$ .

8. Вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, оценивается по соотношению:

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \ln V_1.$$

Фактор  $V_1$  рассчитывается с учетом перепада давления в волне и импульса статического давления по соотношению:

$$V_1 = \left(17500/\Delta P\right)^{8,4} + \left(290/I\right)^{9,3}.$$

9. Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается по соотношению:

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln V_2.$$

Фактор  $V_1$  рассчитывается с учетом перепада давления в волне и импульса статического давления по соотношению:

$$V_2 = \left(40000/\Delta P\right)^{7,4} + \left(460/I\right)^{11,3}.$$

10. Вероятность длительной потери людьми ориентации в пространстве и (или) координации движений (состояние нокдауна), попавшими в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС, может быть оценена по величине пробит-функции

$$Pr_3 = 5 - 5,74 \ln V_3.$$

Фактор опасности  $V_3$  рассчитывается по соотношению:

$$V_3 = \frac{4,2}{\bar{p}} + \frac{1,3}{\bar{i}}.$$

Безразмерное давление и безразмерный импульс задаются выражениями:

$$\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0} \quad \text{и} \quad \bar{i} = I / (P_0^{1/2} m^{1/3}),$$

где  $m$  – масса тела живого организма, кг.

11. Вероятность разрыва барабанных перепонок у людей может оцениваться по пробит-функции:

$$Pr_4 = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P.$$

12. Вероятность отброса людей волной давления может оцениваться по величине пробит-функции:

$$Pr_5 = 5 - 2,44 \ln V_5.$$

Здесь фактор  $V_5$  рассчитывается из соотношения:

$$V_5 = 7,38 \cdot 10^3 / \Delta P + 1,3 \cdot 10^9 / (\Delta P I).$$

### ПРИМЕР

В результате аварии на автодороге, проходящей по открытой местности, в безветренную погоду произошел разрыв автоцистерны, содержащей 8 т сжиженного пропана. Для оценки максимально возможных последствий принято, что в результате выброса газа в пределах воспламенения оказалось практически все топливо, перевезившееся в цистерне. Средняя концентрация пропана в образовавшемся облаке составила около 140 г/м<sup>3</sup>. Расчетный объем облака составил 57 тыс. м<sup>3</sup>. Воспламенение облака привело к возникновению взрывного режима его превращения. Требуется определить параметры воздушной ударной волны (избыточное давление и импульс фазы сжатия) на расстоянии 100 м от места аварии.

### Решение:

Сформируем исходные данные для дальнейших расчетов:

тип топлива – пропан;

агрегатное состояние смеси – газовая;

концентрация горючего в смеси  $c_r = 0,14$  кг/м<sup>3</sup>;

стехиометрическая концентрация пропана с воздухом  $c_{ст} = 0,077$  кг/м<sup>3</sup>;

масса топлива, содержащегося в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва  $M_r = 8000$  кг;

удельная теплота сгорания топлива  $q_r = 4,64 \cdot 10$  Дж/кг;

окружающее пространство – открытое;

облако ТВС лежит на поверхности земли.

1. Определим скорость фронта пламени:

$$V_r = k_1 M_r^{1/6} = 43 \cdot 8000^{1/6} = 192,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2. Определим эффективный энергозапас ТВС  $E$ . Так как  $c_r > c_{ст}$ , следовательно:

$$E = 2 \cdot M_r q_r \frac{c_{ст}}{c_r} = 2 \cdot 8000 \cdot 4,64 \cdot 10^7 \cdot 0,077 / 0,14 = 4,1 \cdot 10^{11} \text{ Дж.}$$

3. Для заданного расстояния  $R = 100$  м рассчитываем безразмерное расстояние  $R_x$ :

$$R_x = R / (E/P_0)^{1/3} = 100 / (4,1 \cdot 10^{11} / 101324)^{1/3} = 0,63.$$

4. Находим безразмерное давление  $P_x$ :

$$P_x = (V_r/C_0)^2 ((\sigma - 1)/\sigma) (0,83/R_x - 0,14/R_x^2) = \\ = (192/331)^2 \cdot (6/7) \cdot (0,83/0,63 - 0,14/0,63^2) = 0,29.$$

5. Находим безразмерный импульс сжатия фазы  $I_x$ :

$$I_x = (V_r/C_0) ((\sigma - 1)/\sigma) \cdot (1 - 0,4 \cdot (V_r/C_0) \cdot ((\sigma - 1)/\sigma)) \left( \frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right) \\ = (192/331) \cdot (6/7) \cdot \left( 1 - 0,4 \cdot (192/331) \cdot \frac{6}{7} \right) \cdot \left( \frac{0,06}{0,63} + \frac{0,01}{0,63^2} - \frac{0,0025}{0,63^3} \right) = 0,498.$$

6. После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия вычисляются соответствующие им размерные величины:

$$\Delta P = P_x P_0 = 0,29 \cdot 101324 = 2,84 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

$$I = I_x (P_0)^{2/3} \frac{E^{2/3}}{C_0} = 0,497 \cdot 101324^{2/3} \cdot \frac{(4,1 \cdot 10^{11})^{2/3}}{331} = 2,4 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с.}$$

7. Используя полученные значения  $\Delta P$  и  $I$  находим:

$$Pr_1 = 6,06;$$

$$Pr_2 = 4,44.$$

8. Методом интерполяции по таблице 1 связь вероятности поражения с пробит-функцией находим, что вероятность повреждения стен производственных зданий равна 87%, а вероятность разрушения производственных зданий оставляет 28,3 %.

**Вывод:** в результате аварии на автодороге произошел разрыв автоцистерны, содержащей 8 т сжиженного пропана. Вероятность повреждения стен производственных зданий равна 87%, а вероятность разрушения производственных зданий оставляет 28,3 %. Избыточное давление и импульс фазы сжатия на расстоянии 100 м от места аварии соответственно равны  $\Delta P = 2,84 \cdot 10^4$  Па,  $I = 2,4 \cdot 10^4$  Па · с.

## Прогнозирование и оценка последствий аварийных взрывов топливовоздушных смесей (ТВС)

В результате аварии на автодороге, проходящей по открытой местности, в безветренную погоду произошел разрыв автоцистерны, содержащей  $M$  т **горючего вещества**. Для оценки максимально возможных последствий принято, что в результате выброса газа в пределах воспламенения оказалось практически все топливо, перевозившееся в цистерне. Средняя концентрация горючего вещества в образовавшемся облаке составила около  $c_r$  г/м<sup>3</sup>. Расчетный объем облака составил 57 тыс. м<sup>3</sup>. Воспламенение облака привело к возникновению взрывного режима его превращения. Требуется определить параметры воздушной ударной волны (избыточное давление и импульс фазы сжатия) на расстоянии  $R$  м от места аварии, а также вероятности повреждения стен промышленных зданий, разрушения промышленных зданий, длительной потери людьми ориентации в пространстве, разрыва барабанных перепонок у людей и отброса людей волной давления.

Исходные данные:

Варианты задания	Значение $M$ , кг	$c_r$ , кг/м <sup>3</sup>	$R$ , м	Вещество	Температура окружающей среды, $t^{\circ}\text{C}$
1	6200	0,19	150	пропан	17
2	8100	0,13	130	бутан	16
3	7300	0,15	160	этилен	19
4	5500	0,16	110	пропан	20
5	8300	0,12	170	бутан	15
6	8500	0,14	90	этилен	14
7	7300	0,15	140	пропан	16
8	6400	0,13	100	бутан	18
9	5800	0,15	210	этилен	21
10	5100	0,12	180	пропан	20
11	6100	0,13	110	бутан	15
12	7500	0,15	210	этилен	17
13	7300	0,17	130	пропан	19
14	7000	0,18	190	бутан	18
15	6000	0,15	150	этилен	14

Стехиометрические концентрации горючего вещества с воздухом  $c_{ст}$ , кг/м<sup>3</sup>

бутан	0,084
пропан	0,077
этилен	0,075

Таблица 1

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Класс 1		Класс 2		Класс 3		Класс 4	
Особо чувствительные вещества		Чувствительные вещества		Среднечувствительные вещества		Слабочувствительные вещества	
(Размер детонационной ячейки менее 2 см)		(Размер детонационной ячейки от 2 до 10 см)		(Размер детонационной ячейки от 10 до 40 см)		(Размер детонационной ячейки больше 40 см)	
1	2	3	4	5	6	7	8
	$\beta$		$\beta$		$\beta$		$\beta$
Ацетилен	1,1	Акрилонитрил	0,67	Ацетальдегид	0,56	Аммиак	0,42
Винилацетилен	1,03	Акролеин	0,62	Ацетон	0,65	Бензол	0,88
Водород	2,73	Бутан	1,04	Бензин	1	Декан	1
Гидразин	0,44	Бутилен	1	Винилацетат	0,51	Дизтопливо	1
Изопропилинитрат	0,41	Бутадиен	1	Винилхлорид	0,42	о-дихлорбензол	0,42
Метилацетилен	1,05	1,3-пентадиен	1	Гексан	1	Додекан	1
Нитрометан	0,25	Пропан	1,05	Генераторный газ	0,38	Керосин	1
Окись пропилена	0,7	Пропилен	1,04	Изооктан	1	Метан	1,14
Окись этилена	0,62	Сероуглерод	0,32	Метиламин	0,7	Метилбензол	1
Этилнитрат	0,3	Этан	1,08	Метилацетат	0,53	Метилмеркаптан	0,53
		Этилен	1,07	Метилбутилкетон	0,79	Метилхлорид	0,12
		Широкая фракция легких углеводородов	1	Метилпропилкетон	0,76	Нафталин	0,91
		Диметиловый эфир	0,66	Метилэтилкетон	0,71	Окись углерода	0,23
		Дивиниловый эфир	0,77	Октан	1	Фенол	0,92
		Метилбутиловый эфир	–	Пиридин	0,77	Хлорбензол	0,52
		Диэтиловый эфир	0,77	Сероводород	0,34	Этилбензол	0,90
		Диизопропиловый эфир	0,82	Метиловый спирт	0,52	Дихлорэтан	0,25
				Этиловый спирт	0,62	Трихлорэтан	0,14
				Пропиловый спирт	0,69		
				Амиловый спирт	–		
				Изобутиловый спирт	0,79		

Таблица 2

**Экспертная таблица для определения режима взрывного превращения**

Класс горючего вещества	Вид окружающего пространства			
	1	2	3	4
	Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения			
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

Таблица 3

**Связь вероятности поражения с пробит-функцией**

<i>p</i> , %	Pr									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,5	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,8	4,82	4,85	4,87	4,9	4,92	4,95	4,97
50	5	5,03	5,05	5,08	5,1	5,13	5,15	5,18	5,2	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,5
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09