

# РД 03-409-01 Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей

Утверждена  
Постановлением  
Госгортехнадзора России  
от 26 июня 2001 г. N 25

## ВВЕДЕНИЕ

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.

Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей разработана Научно-техническим центром по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России (НТЦ "Промышленная безопасность") совместно со специалистами ИХФ РАН. В Методике использованы действующие стандарты, отчеты о НИР, выполненные НТЦ "Промышленная безопасность", и другие источники [1 - 15].

В разработке Методики принимали участие д.ф.-м.н. Б.Е. Гельфанд, д.ф.-м.н. С.Б. Дорофеев, д.т.н. В.И. Сидоров, д.т.н. А.С. Печеркин, к.ф.-м.н. А.М. Бартенев, к.ф.-м.н. В.Ф. Мартынюк, к.ф.-м.н. М.В. Лисанов, к.т.н. А.А. Агапов, к.ф.-м.н. В.П. Сидоров, С.И. Сумской.

## ПРИНЯТОЕ СОКРАЩЕНИЕ

ТВС - топливно-воздушная смесь.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

С - скорость звука в воздухе, м/с;

0

C - концентрация горючего вещества в облаке ТВС, кг/куб. м;

г

C - стехиометрическая концентрация вещества в смеси с

ст

воздухом, кг/куб. м;

E - эффективный энергозапас ТВС, Дж;

I - импульс волны давления, Па x с;

I - импульс фазы сжатия, Па x с;

+

I - импульс фазы разрежения, Па x с;

-

I - импульс отраженной волны давления, Па x с;

r+

I - импульс отраженной волны разрежения, Па x с;

r-

I - безразмерный импульс фазы сжатия;

x

K - декремент затухания;

i

K - декремент изменения давления в отраженной волне;

r

M - масса горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС, кг;

г

ДЕЛЬТА P - избыточное давление, Па;

ДЕЛЬТА P - амплитуда волны давления, Па;

+

ДЕЛЬТА P - амплитуда волны разрежения, Па;

-  
ДЕЛЬТА P - амплитуда отраженной волны давления, Па;

r+

ДЕЛЬТА P - амплитуда отраженной волны разрежения, Па;

r-

P - атмосферное давление, Па;

0

P - безразмерное давление;

x

Pr - пробит-функция повреждений стен промышленных зданий;

1

Pr - пробит-функция разрушения промышленных зданий;

2

Pr - пробит-функция длительной потери управляемости у людей

3

(состояние нокдауна);

Pr - пробит-функция разрыва барабанных перепонки у людей;

4

Pr - пробит-функция отброса людей волной давления;

5

R - расстояние от центра облака ТВС, м;

R - безразмерное расстояние от центра облака ТВС;

x

V - скорость видимого фронта пламени, м/с;

г

W - тротиловый эквивалент взрыва ТВС, кг;

г

t - время процесса, с;

бета - корректировочный параметр, характеризующий фугасные

свойства ТВС;

лямбда - параметрическое расстояние;

сигма - степень расширения продуктов сгорания;

тау - длительность фазы сжатия, с;

+

тау - длительность фазы разрежения, с;

-

тау - длительность отраженной волны давления, с;

г+

тау - длительность отраженной волны разрежения, с.

г-

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Методика предназначена для количественной оценки параметров воздушных ударных волн при взрывах топливно-воздушных смесей, образующихся в атмосфере при промышленных авариях. При рассмотрении предполагается частичная разгерметизация или 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.

1.2. Методика позволяет определять вероятные степени поражения людей и степени повреждений зданий от взрывной нагрузки при авариях со взрывами топливно-воздушных смесей.

1.3. Предполагается, что в образовании облака ТВС участвует горючее вещество одного вида, в противном случае (для смеси нескольких горючих веществ) характеристики ТВС, используемые при расчетах параметров ударных волн, определяются отдельно.

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

характеристики горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС;

агрегатное состояние ТВС (газовая или гетерогенная);

средняя концентрация горючего вещества в смеси С ;

г стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом С ;

ст

масса горючего вещества, содержащегося в облаке,  $M$  (если эта величина неизвестна, то ее расчет рекомендуется проводить согласно приложению 1 [15]);

удельная теплота сгорания горючего вещества  $q$  ;

г

информация об окружающем пространстве.

1.5. Основными структурными элементами алгоритма расчетов (рис. 1) являются:

определение массы горючего вещества, содержащегося в облаке;

определение эффективного энергозапаса ТВС;

определение ожидаемого режима взрывного превращения ТВС;

расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн для различных режимов;

определение дополнительных характеристик взрывной нагрузки;

оценка поражающего воздействия взрыва ТВС.

1.6. В Приложении к Методике приведены примеры расчетов.

Исходные данные:  
 характеристики горючего вещества облака ТВС  
 агрегатное состояние ТВС  
 средняя концентрация горючего вещества в облаке ТВС  $C$   
 стехиометрическая концентрация горючего вещества с воздухом  $C_{ст}$   
 $\rho$   
 масса горючего вещества в облаке  $M$   
 $\rho$   
 удельная теплота сгорания горючего вещества  $q$   
 $\rho$   
 информация об окружающем пространстве



Определение эффективного энергозапаса ТВС  
 $E = M \cdot q$  при  $C \leq C_{ст}$   
 $\rho \quad \rho \quad \rho \quad \rho \quad \rho \quad \rho$   
 или  
 $E = M \cdot q \cdot C / C_{ст}$  при  $C > C_{ст}$   
 $\rho \quad \rho \quad \rho \quad \rho \quad \rho \quad \rho$   
 При расчете параметров взрыва облака, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается



Определение ожидаемого режима взрывного превращения  
 $R_x = R_0 / (E / P_0)^{1/3}$   
 Расчет безразмерного расстояния  
 Расчет параметрического расстояния  $\lambda = 100 R_0 / E^{1/3}$



Детонация

Дефлаграция

Определение основных параметров взрыва ТВС (безразмерные давление Р и импульс I )

∖/

∖/

∖/

Облако газовой ТВС

$$\ln(P) = -1,124 - \frac{1,66 \ln(R)}{x} + 0,26 \frac{(\ln(R))^2}{x}$$

$$\ln(I) = -3,4217 - \frac{0,898 \ln(R)}{x} + 0,0096 \frac{(\ln(R))^2}{x}$$

Облако гетерогенной ТВС

$$P = 0,125 / R + 0,137 / R^2 + 0,023 / R^3$$

$$I = 0,022 / R \text{ или } P = 0,271 / \lambda + 0,62 / \lambda^2 + 0,236 / \lambda^3$$

$$I = 0,047 / \lambda$$

$$P = \left( \frac{V}{C} \right)^2 \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left( 0,83 / R - 0,14 / R^2 \right)$$

$$I = \left( \frac{V}{C} \right) \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left( 1 - 0,4 \frac{(\sigma - 1) V}{\sigma C} + \left( 0,06 / R + 0,01 / R^2 - 0,0025 / R^3 \right) \right)$$

где  $\sigma = 7$  для газовых смесей;  $\sigma = 4$  для гетерогенных смесей, при этом энергозапас гетерогенной смеси домножается на  $(\sigma - 1) / \sigma$

Определение размерных величин

$$\Delta P = P \frac{R}{x} \text{ и } I = I \left( \frac{P}{x} \right)^{2/3} \frac{1}{C} / \frac{1}{C}$$

Определение дополнительных характеристик взрыва ТВС

∖/

Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси  
(давление, импульс и длительность фаз сжатия и разрежения)

$$\ln(\Delta P / P_0) = 0,299 - 2,058 \ln \lambda + 0,26(\ln \lambda)^2$$

$$\text{и } \ln(\Delta P / P_0) = -1,46 - 1,402 \ln \lambda +$$

$$0,079(\ln \lambda)^2$$

$$\ln(10^5 \tau_{\text{сж}} / E^{1/3}) = 0,106 + 0,448 \ln \lambda - 0,026 \times$$

$$(\ln \lambda)^2 \text{ и } \ln(10^5 \tau_{\text{р}} / E^{1/3}) = 1,299 + 0,412 \ln \lambda -$$

$$0,079(\ln \lambda)^2$$

$$\ln(I / E^{1/3}) = -0,843 - 0,932 \ln \lambda - 0,037(\ln \lambda)^2 \text{ и}$$

$$\ln(I / E^{1/3}) = -0,873 - 1,25 \ln \lambda + 0,132(\ln \lambda)^2$$

Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения

$$\Delta P(t, \lambda) = \Delta P \left( \frac{\sin(\pi(t - \tau_{\text{сж}}) / \tau_{\text{сж}}) / \right.$$

$$\left. \sin(-\pi \tau_{\text{р}} / \tau_{\text{р}}) \right) \exp(-K_i t / \tau_{\text{сж}})$$

$$\text{Декремент затухания } K_i = 0,889 - 0,356 \ln \lambda +$$

$$0,105(\ln \lambda)^2$$



|  
√

Параметры отраженной волны (давление, импульс и длительность фаз сжатия и разрежения)

$$\ln(\Delta P_{r+} / P_0) = 1,264 - 2,056 \ln \lambda +$$

$$0,211(\ln \lambda)^2 \text{ и } \ln(\Delta P_{r-} / P_0) = -0,673 -$$

$$1,043 \ln \lambda + 0,252(\ln \lambda)^2$$

$$\ln(10 \tau_{r+}^5 / E^{1/3}) = -0,109 + 0,983 \ln \lambda -$$

$$0,23(\ln \lambda)^2 \text{ и } \ln(10 \tau_{r-}^5 / E^{1/3}) = 1,265 +$$

$$0,857 \ln \lambda - 0,192(\ln \lambda)^2$$

$$\ln(I_{r+} / E^{1/3}) = -0,07 - 1,033 \ln \lambda + 0,045(\ln \lambda)^2 \text{ и}$$

$$\ln(I_{r-} / E^{1/3}) = -0,052 - 0,462 \ln \lambda - 0,27(\ln \lambda)^2$$

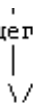
Форма отраженной волны с описанием фаз сжатия и разрежения

$$\Delta P_r(t, \lambda) = \Delta P_{r+} (\sin(\pi(t - \tau_{r+}) / \tau_{r+}) / \tau_{r+} -$$

$$\sin(-\pi \tau_{r+} / \tau_{r-}) \exp(-K t / \tau_{r+})$$

$$\text{Декремент затухания } K = 0,978 - 0,554 \ln \lambda +$$

$$0,26(\ln \lambda)^2$$



Вероятность повреждений стен промышленных зданий  $P_1 = 5 - 0,26 \ln V_1$ , где  $V_1 = (17500 / \Delta P)^{8,4} + (290 / I)^{9,3}$

Вероятность разрушений промышленных зданий  $P_2 = 5 - 0,22 \ln V_2$ , где  $V_2 = (40000 / \Delta P)^{7,4} + (460 / I)^{11,3}$

Вероятность длительной потери управляемости у людей  $P_3 = 5 - 5,74 \ln V_3$ , где  $V_3 = 4,2 / \bar{p} + 1,3 / \bar{i}$ , здесь  $\bar{p} = 1 + \Delta P / P_0$ ,  $\bar{i} = I / (P_0 \cdot m)$

Вероятность разрыва барабанных перепонок  $P_4 = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P$

Вероятность отброса людей ударной волной  $P_5 = 5 - 2,44 \ln V_5$ , где  $V_5 = 7,38 \times 10^3 / \Delta P + 1,3 \times 10^9 / (\Delta P \cdot I)$

Рис. 1. Алгоритм расчета последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТВС

### 2.1. Определение эффективного энергозапаса ТВС

Эффективный энергозапас горючей смеси определяется по соотношению:

$$E = M q \text{ при } C \leq C_1 \quad (1)$$

г г г ст

или

$$E = M q C / C_1 \text{ при } C > C_1 .$$

г г ст г г ст

При расчете параметров взрыва облака, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается. Для оценки объема газового облака ТВС можно воспользоваться простым соотношением:

$$V = M / C .$$

г ст

Примечания. 1. Стехиометрическая концентрация горючего вещества в ТВС определяется из справочных данных или рассчитывается отдельно.

2. В случае, если определение концентрации горючего вещества в смеси затруднено, в качестве величины  $C$  в соотношении (1) принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа.

3. Теплота сгорания горючего газа  $q$  в ТВС берется из справочных данных или оценивается по формуле:

$$q = 44 \beta \text{ МДж/кг} .$$

г

Корректировочный параметр  $\beta$  для наиболее распространенных в промышленном производстве опасных веществ определяется из табл. 1.

4. Масса горючего газа, содержащегося в облаке ТВС, может задаваться в качестве исходного параметра или определяться исходя из условий развития аварий. При оценке последствий аварий массу  $M$  рекомендуется определять согласно [15].

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
	бета		бета		бета		бета
Ацетилен	1,1	Акрило- нитрил	0,67	Ацетальде- гид	0,56	Аммиак	0,42
Винил- ацетилен	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
Изопро- пилнитрат	0,41	Бутадиен	1	Винилхло- рид	0,42	о-дихлор- бензол	0,42
Метил- ацетилен	1,05	1,3- пентадиен	1	Гексан	1	Додекан	1
Нитро- метан	0,25	Пропан	1,05	Генератор- ный газ	0,38	Керосин	1
Окись пропилена	0,7	Пропилен	1,04	Изооктан	1	Метан	1,14
Окись этилена	0,62	Серо- углерод	0,32	Метиламин	0,7	Метилбензол	1
Этилнит- рат	0,3	Этан	1,08	Метилацетат	0,53	Метилмер- каптан	0,53
		Этилен	1,07	Метилбутил- кетон	0,79	Метилхлорид	0,12
		ШФЛУ	1	Метилпро- пилкетон	0,76	Нафталин	0,91
		Диметило-вый эфир	0,66	Метилэтил- кетон	0,71	Окись углерода	0,23
		Дивинило-вый эфир	0,77	Октан	1	Фенол	0,92
		Метил- бутиловый эфир	-	Пиридин	0,77	Хлорбензол	0,52
		Диэтило- вый эфир	0,77	Сероводород	0,34	Этилбензол	0,90
		Диизопро-пиловый эфир	0,82	Метиловый спирт	0,52	Дихлорэтан	0,25
				Этиловый спирт	0,62	Трихлорэтан	0,14
				Пропиловый спирт	0,69		
				Амиловый спирт	-		
				Изобутило- вый спирт	0,79		
				Изопропило- вый спирт	0,69		
				Циклогексан	1		

				Этилформиат	0,46		
				Этилхлорид	0,43		
				Сжиженный природный газ	1		
				Кумол	0,84		
				Печной газ	0,09		
				Циклопропан	1		
				Этиламин	0,8		

## 2.2. Определение ожидаемого режима взрывного превращения

### 2.2.1. Классификация горючих веществ по степени чувствительности

ТВС, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своим взрывоопасным свойствам разделены на четыре класса. Классификация горючих веществ приведена в табл. 1 [1, 2].

В случае, если вещество отсутствует в табл. 1, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в таблице веществами, а при отсутствии информации о свойствах данного вещества - относить его к классу 1, т.е. рассматривать как наиболее опасный случай.

### 2.2.2. Классификация окружающей территории

В связи с тем, что характер окружающего пространства в значительной степени определяет скорость взрывного превращения облака ТВС и, следовательно, параметры ударной волны, геометрические характеристики окружающего пространства разделены на виды в соответствии со степенью его загроможденности.

Вид 1. Наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно ожидать формирование турбулентных струй продуктов сгорания с размером не менее трех размеров детонационной ячейки данной смеси. Если размер детонационной ячейки для данной смеси неизвестен, то минимальный характерный размер турбулентных струй принимается равным 5 см для веществ класса 1; 20 см - для веществ класса 2; 50 см - для веществ класса 3 и 150 см - для веществ класса 4.

Вид 2. Сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий.

Вид 3. Среднезагроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк.

Вид 4. Слабо загроможденное и свободное пространство.

### 2.2.3. Классификация ожидаемого режима взрывного превращения

Известны два основных режима протекания быстропотекающих процессов - детонация и дефлаграция [3]. Для оценки параметров действия взрыва возможные режимы взрывного превращения ТВС разбиты 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.

Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения определяется с помощью экспертной табл. 2 в зависимости от класса горючего вещества и вида окружающего пространства [4].

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

Ниже приводится разбиение режимов 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 [4]:

$$1/6$$

$$V = k M, (2)$$

г 1 г

где k - константа, равная 43.

1

Диапазон 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется

соотношением [4]:

$$1/6$$

$$V = k M, (3)$$

г 2 г

где k - константа, равная 26.

2

#### 2.2.4. Оценка агрегатного состояния ТВС

Для дальнейших расчетов необходимо оценить агрегатное состояние топлива смеси. Предполагается, что смесь гетерогенная, если более 50% топлива содержится в облаке в виде капель, в противном случае 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 °С, смесь можно считать газовой, а для веществ с низким давлением насыщенного пара (распыл дизтоплива при +20 °С) расчеты проводятся в предположении гетерогенной топливно-воздушной смеси.

## 2.3. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн

После того как определен вероятный режим взрывного превращения, рассчитываются основные параметры воздушных ударных волн (избыточное давление ДЕЛЬТА Р и импульс волны давления I) в зависимости от расстояния до центра облака.

### 2.3.1. Детонация газовых и гетерогенных ТВС

$$R = R / (E / P) \quad (4)$$

x 0

Примечание. Все соотношения также могут быть записаны в

1/3

функциях аргумента лямбда = 100 R / E . При принятых в Методике допущениях между R и лямбда существует простая связь:

x

$$\text{лямбда} = 2,15 R .$$

x

Далее рассчитываются безразмерное давление P и безразмерный x

импульс фазы сжатия I .

x

В случае детонации облака газовой ТВС расчет производится по следующим формулам [8]:

2

$$\ln(P) = -1,124 - 1,66 \ln(R) + 0,26(\ln(R)) \pm 10\%; \quad (5)$$

x x x

$$\ln(I) = -3,4217 - 0,898 \ln(R) -$$

x x

2

$- 0,0096 (\ln(R)) \pm 15\%$ . (6)

x

Зависимости (5) и (6) справедливы для значений  $R$ , больших  $x$

величины  $R = 0,2$  и меньших  $R = 24$ . В случае  $R < 0,2$  величина  $P$  к к к к  $x$

полагается равной 18, а в выражение (6) подставляется значение  $R = 0,142$ .

x

В случае детонации облака гетерогенной ТВС расчет производится по следующим формулам:

2 3

$P = 0,125 / R + 0,137 / R + 0,023 / R \pm 10\%$ ; (7)

x x x x

$I = 0,022 / R \pm 15\%$ . (8)

x x

Зависимости (7) и (8) справедливы для значений  $R$ , больших  $x$

x

величины  $R = 0,25$ . В случае, если  $R < R$ , величина  $P$  полагается к к к к  $x$

равной 18, а величина  $I = 0,16$ .

x

### 2.3.2. Дефлаграция газовых и гетерогенных ТВС

В случае дефлаграционного взрывного превращения облака ТВС к параметрам, влияющим на величины избыточного давления и импульса положительной фазы, добавляются скорость видимого фронта пламени ( $V$ ) и степень расширения продуктов сгорания (сигма). Для газовых г

смесей принимается  $\sigma = 7$ , для гетерогенных -  $\sigma = 4$ . Для расчета параметров ударной волны при дефлаграции гетерогенных облаков величина эффективного энергозапаса смеси домножается на

коэффициент  $(\sigma - 1) / \sigma$ .

Безразмерные давление  $P$  и импульс фазы сжатия  $I \times 1 \times 1$

определяются по соотношениям:

2



$$P = (V / C) ((\sigma - 1) / \sigma) \times$$

$\times 1 \text{ г 0}$

2

$$\times (0,83 / R - 0,14 / R); (9)$$

$\times \times$

$$I = (V / C) ((\sigma - 1) / \sigma) \times$$

$\times 1 \text{ г 0}$

$$\times (1 - 0,4(\sigma - 1) V / \sigma C) \times$$

$\text{г 0}$

2 3

$$\times (0,06 / R + 0,01 / R - 0,0025 / R). (10)$$

$\times \times \times$

Последние два выражения справедливы для значений  $R$ , больших  $\times$

величины  $R = 0,34$ , в противном случае вместо  $R$  в соотношения  $\text{кр } \times$

(9) и (10) подставляется величина  $R$ .

$\text{кр}$

Далее вычисляются величины  $P$  и  $I$ , которые соответствуют  $\times 2 \times 2$

режиму детонации и для случая детонации газовой смеси рассчитываются по соотношениям (5), (6), а для детонации гетерогенной смеси - по соотношениям (7), (8). Окончательные значения  $P$  и  $I$  выбираются из условий:

$\times \times$

$$P = \min(P_1, P_2); I = \min(I_1, I_2). (11)$$

$\times \times 1 \times 2 \times \times 1 \times 2$

После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия вычисляются соответствующие им размерные величины [5, 6]:

$$\Delta P = P_2 - P_1; (12)$$

$\times 0$

2/3 1/3

$$I = I(P) E / C. (13)$$

$\times 0 0$

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВА ТВС

### 3.1. Профиль ударной волны

Характерный профиль ударной волны при взрыве ТВС показан на рис. 2 <\*>.

-----  
<\*> Рисунки 2, 3, 4 не приводятся.

Ниже показано, как определяются количественные характеристики дополнительных параметров ударной волны.

### 3.2. Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси

Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси рассчитываются по следующим соотношениям [7 - 11].

Амплитуда фазы сжатия

$$\ln(\Delta P / P) = 0,299 - 2,058 \ln \lambda +$$

+ 0

2

$$+ 0,26(\ln \lambda) \cdot (14)$$

Амплитуда фазы разрежения

$$\ln(\Delta P / P) = -1,46 - 1,402 \ln \lambda +$$

- 0

2

$$+ 0,079(\ln \lambda) \cdot (15)$$

Длительность фазы сжатия

5 1/3

$$\ln(10 \tau / E) = 0,106 + 0,448 \ln \lambda -$$

+

2

$$- 0,026(\ln \lambda) \cdot (16)$$

Длительность фазы разрежения

5 1/3

$$\ln(10 \tau_{ay} / E) = 1,299 + 0,412 \ln \lambda -$$

-

Импульс фазы сжатия

1/3

$$\ln(I / E) = -0,843 - 0,932 \ln \lambda -$$

+

2

$$- 0,037(\ln \lambda) . (18)$$

Импульс фазы разрежения

1/3

$$\ln(I / E) = -0,873 - 1,25 \ln \lambda +$$

-

2

$$+ 0,132(\ln \lambda) . (19)$$

Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения в наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением:

$$\Delta P(t, \lambda) = \Delta P \left( \sin(\pi(t - \tau_{ay}) / \right.$$

++

$$\left. / \tau_{ay} \right) / \sin(-\pi \tau_{ay} / \tau_{ay}) \exp(-K t / \tau_{ay}) . (20)$$

- + - i +

Декремент затухания в падающей волне рассчитывается по соотношению:

2

$$K = 0,889 - 0,356 \ln \lambda + 0,105(\ln \lambda) .$$

i

### 3.3. Параметры отраженной ударной волны

Для расчета параметров отраженной волны при ее нормальном падении на преграду используются следующие соотношения.

Амплитуда отраженной волны давления

$$\ln(\Delta P / P) = 1,264 - 2,056 \ln \lambda + r + 0,211(\ln \lambda) \cdot (21)$$

Амплитуда отраженной волны разрежения

$$\ln(\Delta P / P) = -0,673 - 1,043 \ln \lambda + r - 0,252(\ln \lambda) \cdot (22)$$

Длительность отраженной волны давления

$$\ln(10 \tau / E) = -0,109 + 0,983 \ln \lambda - r - 0,23(\ln \lambda) \cdot (23)$$

Длительность отраженной волны разрежения

$$\ln(10 \tau / E) = 1,265 + 0,857 \ln \lambda - r - 0,192(\ln \lambda) \cdot (24)$$

Импульс отраженной волны давления

$$\ln(I / E) = -0,07 - 1,033 \ln \lambda + r + 0,045(\ln \lambda) \cdot (25)$$

Импульс отраженной волны разрежения

1/3

$\ln(I/E) = -0,052 - 0,462 \ln \lambda -$

$r-$

2

$- 0,27(\ln \lambda) . (26)$

Общее время действия отраженных волн на мишень

5 1/3

$\ln(10(\tau_+ + \tau_-) / E) = 1,497 +$

$r+ r-$

2

$+ 0,908 \ln \lambda - 0,404(\ln \lambda) . (27)$

Форма отраженной волны с описанием фаз сжатия и разрежения с хорошей для практических целей точностью может быть описана соотношением:

$\Delta P(t, \lambda) = \Delta P(\sin(\pi(t - \tau_-) /$

$r r+ r+$

$/ \tau_-) / \sin(-\pi \tau_+ / \tau_-)) \exp(-K t / \tau_-) . (28)$

$r- r+ r- r r+$

Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению: 2

$K = 0,978 - 0,554 \ln \lambda + 0,26(\ln \lambda) . (29)$

$r$

Соотношения (14) - (29) справедливы при значениях  $\lambda$  до 51,6.

### 3.4. Параметры волны при произвольном режиме сгорания

Импульсные характеристики падающих и отраженных волн не зависят от скорости взрывного превращения. Интенсивность и длительность действия ударных волн при  $\lambda \geq 1$  рассчитываются по соотношениям предыдущего раздела. Возможность таких оценок основана на сравнении опытных данных с фактическими сведениями об авариях.

## 4. 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 диаграмме импульс - давление 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% вероятность поражения. Эта типичная особенность диаграмм поражения может быть отражена представлением вероятности достижения того или иного уровня ущерба с помощью пробит-функции  $Pr$ .

i

#### 4.1. Оценка вероятности повреждений промышленных зданий от взрыва облака ТВС

4.1.1. Вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, может оцениваться по соотношению [12]:

$$Pr = 5 - 0,26 \ln V . (30)$$

1 1

Фактор  $V$  рассчитывается с учетом перепада давления в волне и 1

импульса статического давления по соотношению:

8,4 9,3

$$V = (17500 / \Delta P) + (290 / I) . (31)$$

1

4.1.2. Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается по соотношению [12]:

$$Pr = 5 - 0,22 \ln V . (32)$$

2 2

В этом случае фактор  $V$  рассчитывается по формуле:

2

7,4 11,3

$$V = (40000 / \Delta P) + (460 / I) . (33)$$

2

На рис. 3 приведена P-I диаграмма, соответствующая различным значениям поражения зданий ударной волной при взрыве облака ТВС [5, 6].

#### 4.2. Оценка вероятности поражения людей при взрыве облака ТВС

Ниже приводятся соотношения, которые могут быть использованы для расчета уровня вероятности поражения воздушной волной живых организмов (в том числе и человека).

4.2.1. Вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна), попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС, может быть оценена по величине пробит-функции [12, 13]:

Фактор опасности  $V$  рассчитывается по соотношению:

3

--

$$V = 4,2 / p + 1,3 / i. \quad (35)$$

3

Безразмерное давление и безразмерный импульс задаются выражениями:

-- 1/2 1/3

$$p = 1 + \Delta P / P \quad \text{и} \quad i = I / (P m), \quad (36)$$

0 0

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

На рис. 4 приведена  $P$ - $I$  диаграмма, соответствующая различным значениям вероятности поражения людей, попавших в зону действия взрыва [12].

4.2.2. В некоторых источниках сообщается о зависимости вероятности разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне [13]:

$$Pr = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P. \quad (37)$$

4

4.2.3. Вероятность отброса людей волной давления может оцениваться по величине пробит-функции [12, 13]:

$$Pr = 5 - 2,44 \ln V. \quad (38)$$

5 5

Здесь фактор  $V$  рассчитывается из соотношения:

5

3

$$V = 7,38 \times 10 / \Delta P +$$

5

9

$$+ 1,3 \times 10 / (\Delta P I). \quad (39)$$

Связь функции  $Pr$  с вероятностью той или иной степени  $i$  поражения находится по табл. 3

[12].

P, %	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	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
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

### 4.3. Оценка радиусов зон поражения

Для определения радиусов зон поражения может быть предложен (например, [14]) следующий метод, который состоит в численном решении уравнения:

$$k / (\text{ДЕЛЬТА } P(R) - P^*) = I(R) - I^*, \quad (40)$$

причем константы  $k$ ,  $P^*$ ,  $I^*$  зависят от характера зоны поражения и определяются из табл. 4, а функции  $P(R)$  и  $I(R)$  находятся по соотношениям (7) - (13) соответственно.

Таблица 4. КОНСТАНТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУСОВ ЗОН ПОРАЖЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ ТВС



Характеристика действия ударной волны	$I^*$ , Па x с	$P^*$ , Па	$k$ , Па x с <sup>2</sup>
Разрушение зданий			
Полное разрушение зданий	770	70100	886100
Граница области сильных разрушений: 50 - 75% стен разрушено или находится на грани разрушения	520	34500	541000
Граница области значительных повреж- дений: повреждение некоторых конст- руктивных элементов, несущих нагрузку	300	14600	119200
Граница области минимальных повреж- дений: разрывы некоторых соединений, расчленение конструкций	100	3600	8950
Полное разрушение остекления	0	7000	0
50% разрушение остекления	0	2500	0
10% и более разрушение остекления	0	2000	0
Поражение органов дыхания незащищенных людей			
50% выживание	440	243000	$1,44 \times 10^8$
Порог выживания (при меньших значениях смерт. поражения людей маловероятны)	100	65900	$1,62 \times 10^7$

Заметим, что в некоторых источниках [5, 6, 15] предлагается более простая формула для определения радиусов зон поражения, используемая, как правило, для оценки последствий взрывов конденсированных ВВ, но, с известными допущениями, приемлемая и для грубой оценки последствий взрывов ТВС:

$$R = \frac{1}{3} \sqrt[2]{\frac{W}{q}}$$

$$R = K \sqrt[2]{\frac{W}{q}} \left( 1 + \frac{3180}{W} \right), \quad (41)$$

где коэффициент  $K$  определяется согласно табл. 5, а  $W$  - тротильный эквивалент взрыва, определяемый из соотношения:

$$M q$$

$$0,4 \text{ г г}$$

$$W = \frac{M q}{0,96} \times \dots, \quad (42)$$

$$0,96$$

$$4,5 \times 10$$

где  $q$  - теплота сгорания газа.

г

Категория повреждения	Характеристика повреждения здания	Избыточное давление ДЕЛЬТА Р, кПа	Коэффициент К
А	Полное разрушение здания	$\geq 100$	3,8
В	Тяжелые повреждения, здание подлежит сносу	70	5,6
С	Средние повреждения, возможно восстановление здания	28	9,6
Д	Разрушение оконных проемов, легкобрасываемых конструкций	14	28,0
Е	Частичное разрушение остекления		56

Для определения радиуса смертельного поражения человека в соотношение (41) следует подставлять величину  $K = 3,8$ .

## Приложение. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

### Пример 1

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, перевозившееся в цистерне. Средняя концентрация пропана в образовавшемся облаке составила около 140 г/куб. м. Расчетный объем облака составил 57 тыс. куб. м. 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  $C = 0,14$  кг/куб. м;

г

масса топлива, содержащегося в облаке,  $M = 8000$  кг;

г

7

удельная теплота сгорания топлива  $q = 4,64 \times 10$  Дж/кг;

г

окружающее пространство - открытое (вид 4).

Определяем эффективный энергозапас ТВС  $E$ . Так как  $C > C_0$ ,

то следовательно:

7

$$E = 2 M q C / C_0 = 2 \times 8000 \times 4,64 \times 10^6 \times$$

г г ст г

11

$$\times 0,077 / 0,14 = 4,1 \times 10^8 \text{ Дж.}$$

Исходя из классификации веществ, определяем, что пропан относится к классу 2 опасности (чувствительные вещества).

Геометрические характеристики окружающего пространства относятся к виду 4 (открытое пространство). По экспертной табл. 2 определяем ожидаемый режим взрывного превращения облака ТВС - дефлаграция с диапазоном видимой скорости фронта пламени от 150 до 200 м/с. Для проверки рассчитываем скорость фронта пламени по соотношению (2):

1/6 1/6

$$V = k M = 43 \times 8000 = 192 \text{ м/с.}$$

г 1 г

Полученная величина меньше максимальной скорости диапазона данного взрывного превращения.

Для заданного расстояния  $R = 100$  м рассчитываем безразмерное расстояние  $R^*$ :

х

1/3

$$R^* = R / (E / P) =$$

х 0

11 1/3

$$= 100 / (4,1 \times 10^8 / 101324) = 0,63.$$

Рассчитываем параметры взрыва при скорости горения 200 м/с.

Для вычисленного безразмерного расстояния по соотношениям (9) и (10) определяем величины  $P$  и  $I$ :

х1 х1

2 2

$$P = (V / C) ((\sigma - 1) / \sigma) (0,83 / R -$$

x1 г 0 x

2 2 2

$$- 0,14 / R) = 200 / 340 \times 6 / 7 (0,83 / 0,63 -$$

x

2

$$- 0,14 / 0,63) = 0,29;$$

$$I = (V / C) ((\sigma - 1) / \sigma) (1 - 0,4(V / C) x$$

x1 г 0 г 0

2

$$x ((\sigma - 1) / \sigma) (0,06 / R + 0,01 / R -$$

x x

3

$$0,0025 / R) = (200 / 340) ((7 - 1) / 7) x$$

2 3

$$+ 0,01 / 0,63 - 0,0025 / 0,63) = 0,0427.$$

Так как ТВС - газовая, величины P , I рассчитываем по x2 x2 соотношениям (5) и (6):

2

$$P = \exp(-1,124 - 1,66 \ln(R) + 0,26(\ln(R))) =$$

x2 x x

$$= 0,74 \pm 10\%;$$

2

$$I = \exp(-3,4217 - 0,898 \ln(R) - 0,0096(\ln(R))) =$$

x2 x x

$$= 0,049 \pm 15\%.$$

Согласно (11) определяем окончательные значения P и I :

x x

$$P = \min(P , P) = \min(0,29, 0,74) = 0,29;$$

x x1 x2

$$I = \min(I_1, I_2) = \min(0,0427, 0,049) = 0,0427.$$

x x1 x2

Из найденных безразмерных величин  $P$  и  $I$  вычисляем согласно  $x$   $x$

(12) и (13) искомые величины избыточного давления и импульса фазы сжатия в воздушной ударной волне на расстоянии 100 м от места аварии при скорости горения 200 м/с:

4

$$\Delta P = 2,8 \times 10 \text{ Па};$$

2/3 1/3 4

$$I = I(P) \cdot E / C = 2,04 \times 10 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

x 0 0

Используя полученные значения  $\Delta P$  и  $I$ , находим:

$$Pr_1 = 6,06; Pr_2 = 4,47; Pr_3 = -1,93;$$

1 2 3

$$Pr_4 = 3,06; Pr_5 = 2,78$$

4 5

(при расчете  $Pr$  предполагается, что масса человека 80 кг). 3

Это согласно табл. 3 означает: 86% вероятность повреждений и 30% вероятность разрушений промышленных зданий, а также 2,5% вероятность разрыва барабанных перепонок у людей и 1% вероятность отброса людей волной давления. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

## Пример 2

В результате внезапного раскрытия обратного клапана в пространство, загроможденное подводными трубопроводами, выброшено 100 кг этилена. Рядом с загазованным объектом на расстоянии 150 м находится помещение цеха. Концентрация этилена в облаке 80 г/куб. м. Требуется определить степень поражения здания цеха и расположенного в нем персонала при взрыве облака ТВС.

Решение:

Сформируем исходные данные для дальнейших расчетов:

горючий газ - этилен;

агрегатное состояние смеси - газовая;

концентрация горючего в смеси  $C = 0,08$  кг/куб. м;

г  
стехиометрическая концентрация этилена с воздухом  $C = 0,09$  ст

масса топлива, содержащегося в облаке,  $M = 100$  кг; г

7  
удельная теплота сгорания горючего газа  $q = 4,6 \cdot 10^7$  Дж/кг; г

окружающее пространство - загроможденное.

Находим эффективный энергозапас горючей смеси  $E$ . Так как  $C < C_{ст}$ , следовательно:

г ст

7 9  
 $E = M q \cdot 2 = 100 \times 4,6 \times 10^7 \times 2 = 9,2 \times 10^9$  Дж.

г г  
Исходя из классификации веществ, определяем, что этилен относится к классу 2 опасности (чувствительные вещества).

Геометрические характеристики окружающего пространства относятся к виду 1 (загроможденное пространство). По экспертной табл. 2 определяем диапазон ожидаемого режима взрывного превращения облака топливно-воздушной смеси - первый, что соответствует детонации.

Для заданного расстояния 150 м определяем безразмерное параметрическое расстояние  $\lambda$ :

$\lambda = R / \sqrt{E} = 150 / \sqrt{9,2 \times 10^9} = 1,5$   
 $\lambda = R / E = 100 \times 150 / (9,2 \times 10^9) = 1,6$

По соотношениям для падающей волны (14) - (19) находим:

амплитуда фазы давления

3  
 $\Delta P / P = 0,064$  или  $\Delta P = 6,5 \times 10^4$  Па

+ 0 +  
при  $P = 101325$  Па;

0  
амплитуда фазы разрежения

3

ДЕЛЬТА P / P = 0,02 или ДЕЛЬТА P = 2 x 10 Па

- 0 -

при P = 101325 Па;

0

длительность фазы сжатия

$\tau_{\text{сж}} = 0,0509 \text{ с};$

+

длительность фазы разрежения

$\tau_{\text{рз}} = 0,127 \text{ с};$

-

импульсы фаз сжатия и разрежения

$I \sim I = 126,4 \text{ Па} \times \text{с}.$

+ -

Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения в наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением:

3

$\Delta P(t) = 6,5 \times 10 (\sin(\pi(t - 0,0509) / 0,1273) / \sin(-\pi 50,9 / 0,1273)) \exp(-0,6t / 0,0509).$

Используя полученные значения ДЕЛЬТА P и I, по формулам п. 4 + + имеем:

$P_r = 2,69; P_r = 1,69; P_r = -11,67;$

1 2 3

$P_r = 0,76; P_r = -13,21$

4 5

(при расчете  $P_r$  предполагается, что масса человека 80 кг).

3

Это согласно табл. 3 означает 1% вероятность разрушений производственных зданий. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

По соотношениям для отраженной волны (21) - (26) находим:

амплитуда отраженной волны давления

4

ДЕЛЬТА P / P = 0,14 или ДЕЛЬТА P = 1,4 x 10 Па

r+ 0 r+

при P = 101325 Па;

0

амплитуда отраженной волны разрежения

4

ДЕЛЬТА P / P = 0,174 или ДЕЛЬТА P = 1,74 x 10 Па

0

длительность отраженной волны давления

тау = 0,0534 с;

r+

длительность отраженной волны разрежения

тау = 0,1906 с;

r-

импульсы отраженных волн давления и разрежения

I = 308 Па x с;

r+

I = 284,7 Па x с.

r-

Форма отраженной волны при взаимодействии со стенкой:

4

ДЕЛЬТА P (t) = 1,4 x 10 (sin(пи(t - 0,0534) / 0,1906) /

r

/ sin(-пи 0,0534 / 0,1906)) exp(-0,8906 t / 0,0534).

Используя полученные значения ДЕЛЬТА P и I , по формулам п. 4 + + имеем:

Pr = 4,49; Pr = 3,28; Pr = -7,96;

1 2 3



Pr = 1,95; Pr = -9,35.

4 5

Это согласно табл. 3 означает вероятности: 30% повреждений и 4% разрушений производственных зданий. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lewis P.J. Prog. Energy Comb. Sc. Vol. 6, pp. 121 - 126, 1980.
  2. M.P. Sherman, M. Berman. Nuclear technology. Vol. 81, pp. 63 - 77, 1988.
  3. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989.
  4. H. Giesbrecht et al., Ger. Chem. Eng. V. 4, part 1 - 2, pp. 305 - 325.
  5. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991.
  6. Бейкер У., Кокс П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия / Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986.
  7. Woolfolk R.W. and Ablow C.M. In Proc. of Conf. on Mechanisms of Explosion and Blast Waves, Feltman Research Laboratory, Picatinny Arsenal, Dover. N. I, p. 42, 1973.
  8. Desrosier C., Reboux A., Brossard J. Effect of asymmetric ignition on the vapor cloud spatial blast. Progr. Aeron. and Astron. (1991) 134: 21 - 37.
  9. Brossard J., Bailly P., Desrosier C., Renard J. Overpressure imposed by a blast wave. Progr. Aeron. and Astron. (1988) 114: 389 - 400.
  10. Brossard J., Leyer J.C., Desbordes D., Saint Clouds J.P., Hendrickx S., Garnier J.L., Lannoy A., Perrot J. (1984). Air blast unconfined gaseous detonations. Progr. Aeron. and Astron. (1984) 94: 556.
  11. Desbordes D., Manson N., Brossard J. (1978). Explosion dans l'air de charges spheriques non confenees de melanges reactifs gazeux. Acta Astronautica 5: 1009.
  12. Methods for the determination of possible damage. Green book / CPR 16E, 1989.
  13. C.M. Pietersen. Consequences of accidental releases of hazardous material (in J. Loss Prev. Process Ind., 1990. Vol. 3, January).
  14. Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности (I редакция). М.: ПАО "Газпром", 1996.
  15. ПБ 09-170-97. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (приложение 1). Утверждены Постановлением Госгортехнадзора России от 22.12.97 N 52.
-