Нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору



Серия 27

Декларирование промышленной безопасности и оценка риска

Выпуск 2

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Сборник документов

2010

gost.e-ecolog.ru

Нормативные документы в сфере деятельности
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору

Серия 27

Декларирование промышленной
безопасности и оценка риска

Выпуск 2

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Сборник документов

3-е издание, исправленное и дополненное

Москва
ЗАО НТЦ ПБ
2010

ББК 30н
М54

Ответственные составители-разработчики:
Е.А. Иванов, А.А. Агапов, К.В. Буйко, Б.Е. Гельфанд, Ю.А. Дадонов, А.М. Ильин, Ю.Ф. Карабанов, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров, С.И. Сумской, А.А. Шаталов, А.В. Пчельников

М54 **Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2** / Колл. авт. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010. — 208 с.

ISBN 978-5-9687-0206-7.

В настоящий Сборник включены методики оценки опасностей, входящие в состав нормативных документов Госгортехнадзора России, а также исправленные и дополненные методики оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей и оценки последствий химических аварий, разработанные ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность». Методики позволяют оценить последствия аварий со взрывами топливно-воздушных смесей и конденсированных взрывчатых материалов, аварий с выбросом опасных химических веществ. Методики могут быть использованы при разработке деклараций промышленной безопасности опасных производственных объектов и экспертизе промышленной безопасности.

ББК 30н

ISBN 978-5-9687-0206-7



© Оформление. Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (РД 03-409–01) 4

Общие принципы количественной оценки взрывоопасности технологических блоков (приложение 1 к ПБ 09-540–03 «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств») 35

Методика расчета участвующей во взрыве массы вещества и радиусов зон разрушений (приложение 2 к ПБ 09-540–03 «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств») 45

Порядок определения безопасных расстояний при взрывных работах и хранении взрывчатых материалов (глава VIII ПБ 13-407–01 «Единые правила безопасности при взрывных работах») 49

Методика расчета концентраций аммиака в воздухе и распространения газового облака при авариях на складах жидкого аммиака 81

Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси». Редакция 2.2) 123

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

Утверждена
постановлением Госгортехнадзора
России от 26.06.01 № 25
Введена в действие
постановлением Госгортехнадзора
России от 26.06.01 № 25

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

РД 03-409–01

(с изменениями и дополнениями)

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

C_0 — скорость звука в воздухе, м/с;
$C_г$ — концентрация горючего вещества в облаке ТВС, кг/м^3;
$C_{ст}$ — стехиометрическая концентрация вещества в смеси с воздухом, кг/м^3;
E — эффективный энергозапас ТВС, Дж;
I — импульс волны давления, Па·с;
I_+ — импульс фазы сжатия, Па·с;
I_- — импульс фазы разрежения, Па·с;
I_{r+} — импульс отраженной волны давления, Па·с;
I_{r-} — импульс отраженной волны разрежения, Па·с;
I_x — безразмерный импульс фазы сжатия;
K_i — декремент затухания;
K_r — декремент изменения давления в отраженной волне;
$M_т$ — масса горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС, кг;
ΔP — избыточное давление, Па;
ΔP_+ — амплитуда волны давления, Па;
ΔP_- — амплитуда волны разрежения, Па;
ΔP_{r+} — амплитуда отраженной волны давления, Па;
ΔP_r — амплитуда отраженной волны разрежения, Па;
P_0 — атмосферное давление, Па;

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

P_x — безразмерное давление;
Pr_1 — пробит-функция повреждений стен промышленных зданий;
Pr_2 — пробит-функция разрушения промышленных зданий;
Pr_3 — пробит-функция длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна);
Pr_4 — пробит-функция разрыва барабанных перепонок у людей;
Pr_5 — пробит-функция отброса людей волной давления;
R — расстояние от центра облака ТВС, м;
$R_{к1}$ и $R_{к2}$ — вспомогательный безразмерный радиус;
R_x — безразмерное расстояние от центра облака ТВС;
$V_г$ — скорость видимого фронта пламени, м/с;
W — тротиловый эквивалент взрыва ТВС, кг;
m — средняя масса человека, кг;
$q_г$ — удельная теплота сгорания газа, Дж/кг;
t — время процесса, с;
b — корректировочный параметр, характеризующий фугасные свойства ТВС;
I — параметрическое расстояние;
s — степень расширения продуктов сгорания;
τ_+ — длительность фазы сжатия, с;
τ_- — длительность фазы разрежения, с;
τ_{r+} — длительность отраженной волны давления, с;
τ_{r-} — длительность отраженной волны разрежения, с.

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 разгерме-

тизация 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 $C_г$;

стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом $C_{ст}$;

масса горючего вещества, содержащегося в облаке, $M_г$ (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;

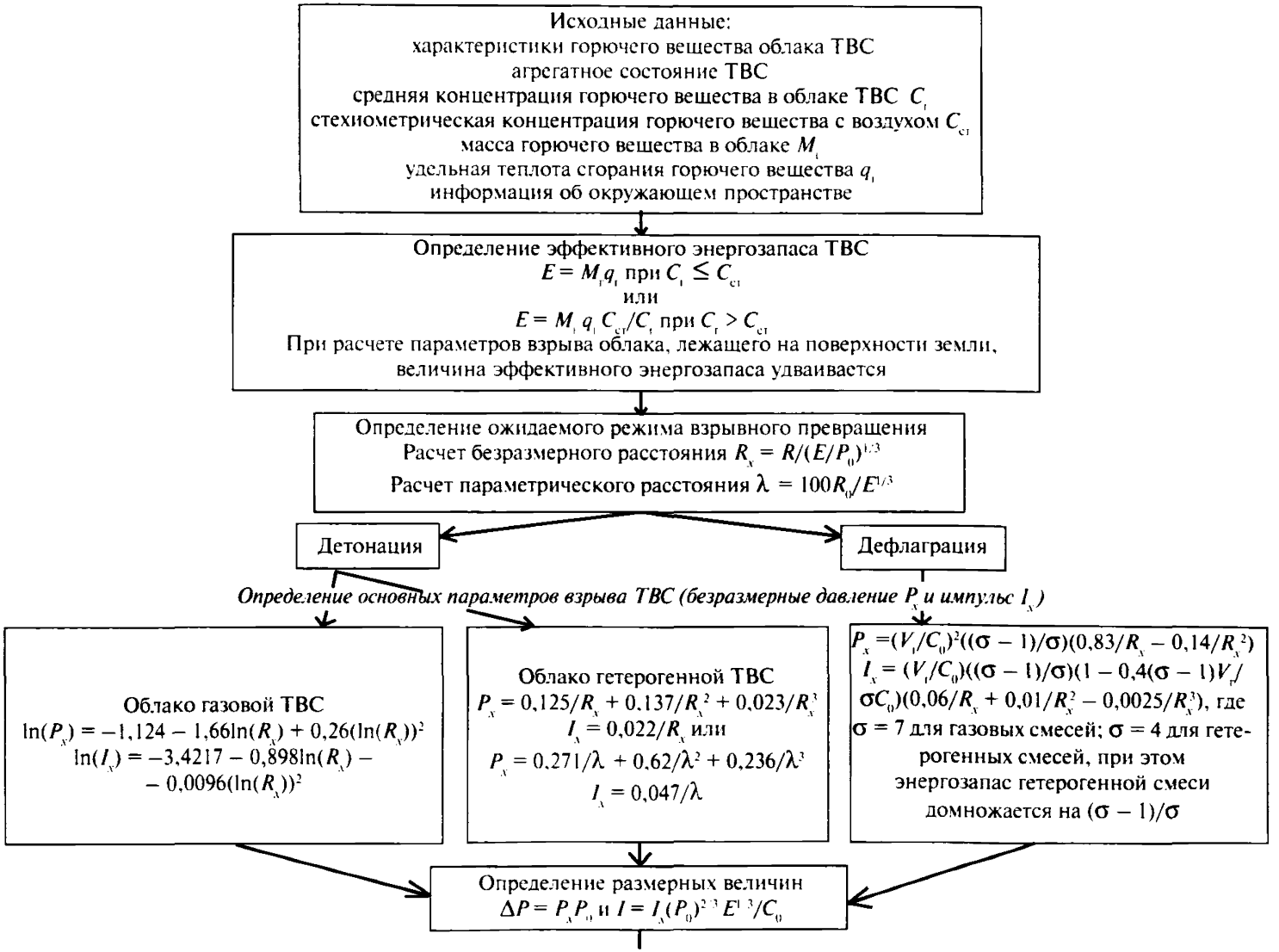
расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн для различных режимов;

определение дополнительных характеристик взрывной нагрузки;

оценка поражающего воздействия взрыва ТВС.

1.6. В приложении к Методике приведены примеры расчетов.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010


Исходные данные:
характеристики горючего вещества облака ТВС
агрегатное состояние ТВС
средняя концентрация горючего вещества в облаке ТВС $C_г$
стехиометрическая концентрация горючего вещества с воздухом $C_{ст}$
масса горючего вещества в облаке $M_г$
удельная теплота сгорания горючего вещества $q_г$
информация об окружающем пространстве
Определение эффективного энергозапаса ТВС
$E = M_г q_г$ при $C_г \le C_{ст}$
или
$E = M_г q_г C_{ст}/C_г$ при $C_г > C_{ст}$
При расчете параметров взрыва облака, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается
Определение ожидаемого режима взрывного превращения
Расчет безразмерного расстояния $R_x = R/(E/P_0)^{1/3}$
Расчет параметрического расстояния $\lambda = 100R_0/E^{1/3}$
Детонация
Дефлаграция
Определение основных параметров взрыва ТВС (безразмерные давление P_x и импульс I_x)
Облако газовой ТВС
$\ln(P_x) = -1{,}124 - 1{,}66\ln(R_x) + 0{,}26(\ln(R_x))^2$
$\ln(I_x) = -3{,}4217 - 0{,}898\ln(R_x) - 0{,}0096(\ln(R_x))^2$
Облако гетерогенной ТВС
$P_x = 0{,}125/R_x + 0{,}137/R_x^2 + 0{,}023/R_x^3$
$I_x = 0{,}022/R_x$ или
$P_x = 0{,}271/\lambda + 0{,}62/\lambda^2 + 0{,}236/\lambda^3$
$I_x = 0{,}047/\lambda$
$P_x = (V_г/C_0)^2((\sigma - 1)/\sigma)(0{,}83/R_x - 0{,}14/R_x^2)$
$I_x = (V_г/C_0)((\sigma - 1)/\sigma)(1 - 0{,}4(\sigma - 1)V_г/\sigma C_0)(0{,}06/R_x + 0{,}01/R_x^2 - 0{,}0025/R_x^3)$, где $\sigma = 7$ для газовых смесей; $\sigma = 4$ для гетерогенных смесей, при этом энергозапас гетерогенной смеси домножается на $(\sigma - 1)/\sigma$
Определение размерных величин
$\Delta P = P_x P_0$ и $I = I_x (P_0)^{2/3} E^{1/3}/C_0$

© Оформление: ЗАО НТЦ ПБ, 2010

Определение дополнительных характеристик взрыва ТВС

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

$\ln(\Delta P_+/P_0) = 0{,}299 - 2{,}058\ln\lambda + 0{,}26(\ln\lambda)^2$ и $\ln(\Delta P_-/P_0) = -1{,}46 - 1{,}402\ln\lambda + 0{,}079(\ln\lambda)^2$

$\ln(10^5\tau_+/E^{1/3}) = 0{,}106 + 0{,}448\ln\lambda - 0{,}026(\ln\lambda)^2$ и $\ln(10^5\tau_-/E^{1/3}) = 1{,}299 + 0{,}412\ln\lambda - 0{,}079(\ln\lambda)^2$

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

$\Delta P(t, \lambda) = \Delta P_+(\sin(\pi(t - \tau_-)/\tau_-)/\sin(-\pi\tau_+/\tau_-))\exp(-K_i t/\tau_+)$

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)

$\ln(\Delta P_{r+}/P_0) = 1{,}264 - 2{,}056\ln\lambda + 0{,}211(\ln\lambda)^2$ и $\ln(\Delta P_{r-}/P_0) = -0{,}673 - 1{,}043\ln\lambda + 0{,}252(\ln\lambda)^2$

$\ln(10^5\tau_{r+}/E^{1/3}) = -0{,}109 + 0{,}983\ln\lambda - 0{,}23(\ln\lambda)^2$ и $\ln(10^5\tau_{r-}/E^{1/3}) = 1{,}265 + 0{,}857\ln\lambda - 0{,}192(\ln\lambda)^2$

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

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

Декремент затухания $K_r = 0{,}978 - 0{,}554\ln\lambda + 0{,}26(\ln\lambda)^2$

Оценка поражающего воздействия

Вероятность повреждений стен промышленных зданий $Pr_1 = 5 - 0{,}26\ln V_1$, где $V_1 = (17500/\Delta P)^{8.4} + (290/I)^{9.3}$

Вероятность разрушений промышленных зданий $Pr_2 = 5 - 0{,}22\ln V_2$, где $V_2 = (40000/\Delta P)^{7.4} + (460/I)^{11.3}$

Вероятность длительной потери управляемости у людей $Pr_3 = 5 - 5{,}74\ln V_3$, где $V_3 = 4{,}2/\bar{p} + 1{,}3/\bar{i}$,

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

Вероятность разрыва барабанных перепонок $Pr_4 = -12{,}6 + 1{,}524\ln\Delta P$

Вероятность отброса людей ударной волной $Pr_5 = 5 - 2{,}44\ln V_5$, где $V_5 = 7{,}38\cdot10^3/\Delta P + 1{,}3\cdot10^9/(\Delta P I)$

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

$$E = M_{\text{г}}\, q_{\text{г}} \text{ при } C_{\text{г}} \le C_{\text{ст}} \qquad (1)$$

или

$$E = M_{\text{г}}\, q_{\text{г}}\, C_{\text{ст}}/C_{\text{г}} \text{ при } C_{\text{г}} > C_{\text{ст}}.$$

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

$$V = M_{\text{г}}/C_{\text{ст}}.$$

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 $C_{\text{г}}$ в соотношении (1) принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа.

3. Теплота сгорания горючего газа $q_{\text{г}}$ в ТВС берется из справочных данных или оценивается по формуле

$$q_{\text{г}} = 44\beta \text{ МДж/кг}.$$

Корректировочный параметр β 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 $M_г$ рекомендуется определять согласно [15].

Таблица 1

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Класс 1		**Класс 2**		**Класс 3**		**Класс 4**	
Особо чувствительные вещества		**Чувствительные вещества**		**Средне-чувствительные вещества**		**Слабо-чувствительные 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
	β		β		β		β
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
Изопропилнитрат	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

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
	β		β		β		β
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
		ШФЛУ	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		

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
				Амиловый спирт	—		
				Изобутиловый спирт	0,79		
				Изопропиловый 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		

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

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. Средне загроможденное 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 быстропротекающих 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].

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

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.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

Диапазон 5. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением [4]:

$$V_г = k_1 M_г^{1/6}, \quad (2)$$

где k_1 — константа, равная 43.

Диапазон 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением [4]:

$$V_г = k_2 M_г^{1/6}, \quad (3)$$

где k_2 — константа, равная 26.

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 ΔP и импульс волны давления I) в зависимости от расстояния до центра облака.

2.3.1. Детонация газовых и гетерогенных ТВС

Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии R от центра облака при детонации облака ТВС

предварительно рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние по соотношению [5, 6]:

$$R_x = R/(E/P_0)^{1/3}. \quad (4)$$

Примечание. Все соотношения также могут быть записаны в функциях аргумента $\lambda = 100R/E^{1/3}$. При принятых в Методике допущениях между R_x и λ существует простая связь: $\lambda = 2{,}15R_x$.

Далее рассчитываются безразмерное давление P_x и безразмерный импульс фазы сжатия I_x.

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

$$\ln(P_x) = -1{,}124 - 1{,}66\ln(R_x) + 0{,}26\,(\ln(R_x))^2 \pm 10\ \%; \quad (5)$$

$$\ln(I_x) = -3{,}4217 - 0{,}898\ln(R_x) - 0{,}0096\,(\ln(R_x))^2 \pm 15\ \%. \quad (6)$$

Зависимости (5) и (6) справедливы для значений R_x, больших величины $R_{к1} = 0{,}2$ и меньших $R_{к2} = 24$. В случае $R_x < 0{,}2$ величина P_x полагается равной 18, а в выражение (6) подставляется значение $R_x = 0{,}142$.

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

$$P_x = 0{,}125/R_x + 0{,}137/R_x^2 + 0{,}023/R_x^3 \pm 10\ \%; \quad (7)$$

$$I_x = 0{,}022/R_x \pm 15\ \%. \quad (8)$$

Зависимости (7) и (8) справедливы для значений R_x больших величины $R_{к1} = 0{,}25$. В случае если $R_x < R_{к1}$, величина P_x полагается равной 18, а величина $I_x = 0{,}16$.

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 ($V_т$) и степень расширения продуктов сгорания (σ).

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

Для газовых 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_{x1} и импульс фазы сжатия I_{x1} определяются по соотношениям:

$$P_{x1} = (V_г/C_0)^2((\sigma - 1)/\sigma)(0{,}83/R_x - 0{,}14/R_x^2); \quad (9)$$

$$I_{x1} = (V_г/C_0)((\sigma - 1)/\sigma)(1 - 0{,}4(\sigma - 1)V_г/\sigma C_0)\times \times(0{,}06/R_x + 0{,}01/R_x^2 - 0{,}0025/R_x^3). \quad (10)$$

Последние два выражения справедливы для значений R_x, больших величины $R_{к1} = 0{,}34$, в противном случае вместо R_x в соотношения (9) и (10) подставляется величина $R_{к1}$.

Далее вычисляются величины P_{x2} и I_{x2}, которые соответствуют 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_x и I_x выбираются из условий:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}); \; I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}). \quad (11)$$

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

$$\Delta P = P_x P_0; \quad (12)$$

$$I = 10 I_x (P_0)^{2/3} E^{1/3}/C_0. \quad (13)$$

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВА ТВС

3.1. Профиль ударной волны

Характерный профиль ударной волны при взрыве ТВС показан на рис. 2.

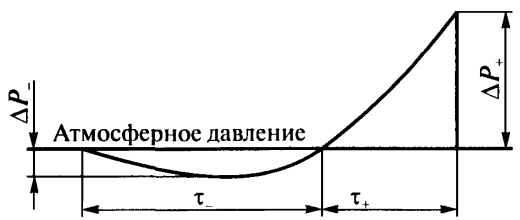


Рис. 2. Характерный профиль ударной волны

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

$$\ln(\Delta P_+/P_0) = 0{,}299 - 2{,}058\ln\lambda + 0{,}26(\ln\lambda)^2. \qquad (14)$$

Амплитуда фазы разрежения

$$\ln(\Delta P_-/P_0) = -1{,}46 - 1{,}402\ln\lambda + 0{,}079(\ln\lambda)^2. \qquad (15)$$

Длительность фазы сжатия

$$\ln(10^5\tau_+/E^{1/3}) = 0{,}106 + 0{,}448\ln\lambda - 0{,}026(\ln\lambda)^2. \qquad (16)$$

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

Длительность фазы разрежения

$$\ln(10^5\tau_-/E^{1/3}) = 1{,}299 + 0{,}412\ln\lambda - 0{,}079(\ln\lambda)^2. \quad (17)$$

Импульс фазы сжатия

$$\ln(I_+/E^{1/3}) = -0{,}843 - 0{,}932\ln\lambda - 0{,}037(\ln\lambda)^2. \quad (18)$$

Импульс фазы разрежения

$$\ln(I_-/E^{1/3}) = -0{,}873 - 1{,}25\ln\lambda + 0{,}132(\ln\lambda)^2. \quad (19)$$

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

$$\Delta P(t, \lambda) = \Delta P_+(\sin(\pi(t - \tau_+)/\tau_-)/\sin(-\pi\tau_+/\tau_-))\exp(-K_i t/\tau_+). \quad (20)$$

Декремент затухания в падающей волне рассчитывается по соотношению

$$K_i = 0{,}889 - 0{,}356\ln\lambda + 0{,}105(\ln\lambda)^2.$$

3.3. Параметры отраженной ударной волны

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

Амплитуда отраженной волны давления

$$\ln(\Delta P_{r+}/P_0) = 1{,}264 - 2{,}056\ln\lambda + 0{,}211(\ln\lambda)^2. \quad (21)$$

Амплитуда отраженной волны разрежения

$$\ln(\Delta P_{r-}/P_0) = -0{,}673 - 1{,}043\ln\lambda + 0{,}252(\ln\lambda)^2. \quad (22)$$

Длительность отраженной волны давления

$$\ln(10^5\tau_{r+}/E^{1/3}) = -0{,}109 + 0{,}983\ln\lambda - 0{,}23(\ln\lambda)^2. \quad (23)$$

Длительность отраженной волны разрежения

$$\ln(10^5\tau_{r-}/E^{1/3}) = 1{,}265 + 0{,}857\ln\lambda - 0{,}192(\ln\lambda)^2. \quad (24)$$

Импульс отраженной волны давления

$$\ln(I_{r+}/E^{1/3}) = -0{,}07 - 1{,}033\ln\lambda + 0{,}045(\ln\lambda)^2. \quad (25)$$

Импульс отраженной волны разрежения

$$\ln(I_{r-}/E^{1/3}) = -0{,}052 - 0{,}462\ln\lambda - 0{,}27(\ln\lambda)^2. \quad (26)$$

Общее время действия отраженных волн на мишень

$$\ln(10^5(\tau_{r+} + \tau_{r-})/E^{1/3}) = 1{,}497 + 0{,}908\ln\lambda - 0{,}404(\ln\lambda)^2. \quad (27)$$

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

$$\Delta P_r(t, \lambda) = \Delta P_{r+}(\sin(\pi(t - \tau_{r+})/\tau_{r-})/\sin(-\pi\tau_{r+})/\tau_{r-}))\exp(-K_r t/\tau_{r+}). \quad (28)$$

Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению

$$K_r = 0{,}978 - 0{,}554\ln\lambda + 0{,}26(\ln\lambda)^2. \quad (29)$$

Соотношения (14)–(29) справедливы при значениях λ 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

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

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]:

$$Pr_1 = 5 - 0{,}26 \ln V_1. \qquad (30)$$

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

$$V_1 = (17\,500/\Delta P)^{8,4} + (290/I)^{9,3}. \qquad (31)$$

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

$$Pr_2 = 5 - 0{,}22 \ln V_2. \qquad (32)$$

В этом случае фактор V_2 рассчитывается по формуле

$$V_2 = (40\,000/\Delta P)^{7,4} + (460/I)^{11,3}. \qquad (33)$$

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

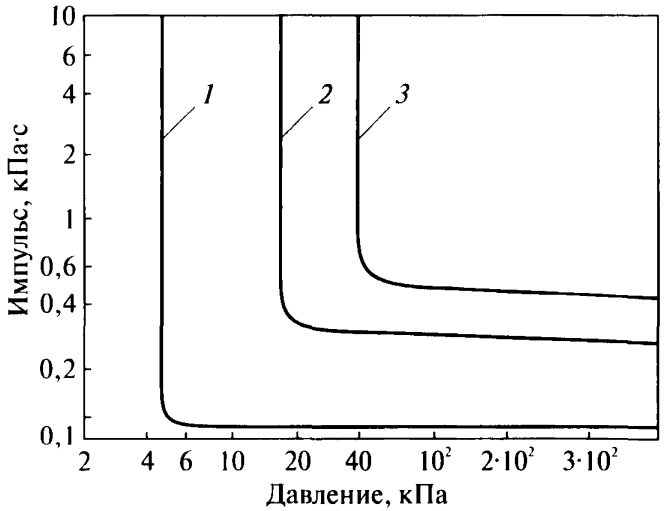


Рис. 3. P-I диаграмма для оценки уровня разрушения промышленных зданий:
1 — граница минимальных разрушений; *2* — граница значительных повреждений; *3* — разрушение зданий (50–75 % стен разрушено)

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]:

$$Pr_3 = 5 - 5{,}74 \ln V_3. \qquad (34)$$

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

Фактор опасности V_3 рассчитывается по соотношению

$$V_3 = 4{,}2/\bar{p} + 1{,}3/\bar{i}\,, \qquad (35)$$

Безразмерное давление и приведенный импульс задаются выражениями:

$$\bar{p} = 1 + \Delta P/P_0 \text{ и } \bar{i} = I/(P_0^{1/2} m^{1/3}), \qquad (36)$$

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].

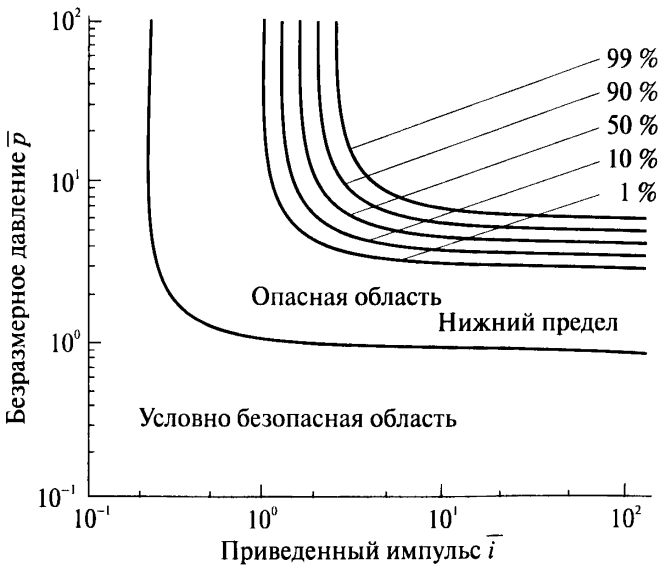


Рис. 4. P-I диаграмма для экспресс-оценки поражения людей от взрыва ТВС

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

$$Pr_4 = -12{,}6 + 1{,}524\ln\Delta P. \qquad (37)$$

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

$$Pr_5 = 5 - 2{,}44\ln V_5. \qquad (38)$$

Здесь фактор V_5 рассчитывается из соотношения

$$V_5 = 7{,}38\cdot 10^3/\Delta P + 1{,}3\cdot 10^9/(\Delta PI). \qquad (39)$$

Связь функции Pr_i с вероятностью той или иной степени поражения находится по табл. 3 [12].

Таблица 3

Связь вероятности поражения с пробит-функцией

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

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

4.3. Оценка радиусов зон поражения

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

$$k/(\Delta P(R) - P^*) = I(R) - I^*, \qquad (40)$$

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·с	P^*, Па	k, Па^2·с
Разрушение зданий			
Полное разрушение зданий	770	70 100	886 100
Граница области сильных разрушений: 50–75 % стен разрушено или находится на грани разрушения	520	34 500	541 000
Граница области значительных повреждений: повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку	300	14 600	119 200
Граница области минимальных повреждений: 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	243 000	$1{,}44\cdot10^8$
Порог выживания (при меньших значениях смерт. поражения людей маловероятны)	100	65 900	$1{,}62\cdot10^7$

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:

$$R = KW^{1/3}/(1 + (3180/W)^2)^{1/6}, \qquad (41)$$

где коэффициент K определяется согласно табл. 5, а W — тротиловый эквивалент взрыва, определяемый из соотношения

$$W = \frac{0{,}4}{0{,}9}\frac{M_T q_г}{4{,}5\cdot 10^6}, \qquad (42)$$

где $q_г$ — теплота сгорания газа.

Таблица 5

Уровни разрушения зданий

Категория повреждения	Характеристика повреждения здания	Избыточное давление ΔP, кПа	Коэффициент K
A	Полное разрушение здания	≥100	3,8
B	Тяжелые повреждения, здание подлежит сносу	70	5,6
C	Средние повреждения, возможно восстановление здания	28	9,6
D	Разрушение оконных проемов, легкосбрасываемых конструкций	14	28,0
E	Частичное разрушение остекления	≤2,0	56

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

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

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/м^3. Расчетный объем облака составил 57 тыс. м^3. 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 $C_г = 0{,}14$ кг/м^3;

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

удельная теплота сгорания топлива $q_г = 4{,}64 \cdot 10^7$ Дж/кг;

окружающее пространство — открытое (вид 4).

Определяем эффективный энергозапас ТВС E. Так как $C_г > C_{ст}$, следовательно,

$$E = 2M_г q_г C_{ст}/C_г = 2 \cdot 8000 \cdot 4{,}64 \cdot 10^7 \cdot 0{,}077/0{,}14 = 4{,}1 \cdot 10^{11} \text{ Дж}.$$

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 опреде-

ляем 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):

$$V_г = k_1 M_г^{1/6} = 43 \cdot 8000^{1/6} = 192 \text{ м/с}.$$

Полученная величина меньше максимальной скорости диапазона данного взрывного превращения.

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

$$R_x = R/(E/P_0)^{1/3} = 100/(4{,}1 \cdot 10^{11}/101\,324)^{1/3} = 0{,}63.$$

Рассчитываем параметры взрыва при скорости горения 200 м/с. Для вычисленного безразмерного расстояния по соотношениям (9) и (10) определяем величины P_{x1} и I_{x1}:

$$P_{x1} = (V_г^2/C_0^2)((\sigma - 1)/\sigma)(0{,}83/R_x - 0{,}14/R_x^2) =$$
$$= 200^2/340^2 \cdot 6/7(0{,}83/0{,}63 - 0{,}14/0{,}63^2) = 0{,}29;$$

$$I_{x1} = (V_г/C_0)((\sigma - 1)/\sigma)(1 - 0{,}4(V_г/C_0)((\sigma - 1)/\sigma)) \times$$
$$\times(0{,}06/R_x + 0{,}01/R_x^2 - 0{,}0025/R_x^3) = (200/340)((7 - 1)/7) \times$$
$$\times(1 - 0{,}4(200/340)((7 - 1)/7))(0{,}06/0{,}63 +$$
$$+ 0{,}01/0{,}63^2 - 0{,}0025/0{,}63^3) = 0{,}0427.$$

Так как ТВС — газовая, величины P_{x2}, I_{x2} рассчитываем по соотношениям (5) и (6):

$$P_{x2} = \exp(-1{,}124 - 1{,}66 \ln(R_x) + 0{,}26 (\ln(R_x))^2) = 0{,}74 \quad \pm 10\%;$$

$$I_{x2} = \exp(-3{,}4217 - 0{,}898 \ln(R_x) - 0{,}0096(\ln(R_x))^2) = 0{,}049 \quad \pm 15\%.$$

Согласно (11) определяем окончательные значения P_x и I_x:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) = \min(0{,}29, 0{,}74) = 0{,}29;$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}) = \min(0{,}0427, 0{,}049) = 0{,}0427.$$

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

Из найденных безразмерных величин P_x и I_x вычисляем согласно (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:

$$\Delta P = 2{,}8 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$I = 10 I_x (P_0)^{2/3} E^{1/3} / C_0 = 2{,}04 \cdot 10^4 \text{ Па·с}.$$

Используя полученные значения ΔP и I, находим:

$$Pr_1 = 6{,}06,\ Pr_2 = 4{,}47,\ Pr_3 = -1{,}93,\ Pr_4 = 3{,}06,\ Pr_5 = 2{,}78$$

(при расчете Pr_{r3} предполагается, что масса человека 80 кг).

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 подводящими трубопроводами, выброшено 100 кг этилена. Рядом с загазованным объектом на расстоянии 150 м находится помещение цеха. Концентрация этилена в облаке 80 г/м^3. 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 $C_г = 0{,}08$ кг/м^3;

стехиометрическая концентрация этилена с воздухом $C_{ст} = 0{,}09$ кг/м^3;

масса топлива, содержащегося в облаке, $M_г = 100$ кг;

удельная теплота сгорания горючего газа $q_г$ =4,6·10^7 Дж/кг;

окружающее пространство — загроможденное.

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

$$E = M_г q_г \cdot 2 = 100 \times 4{,}6 \cdot 10^7 \cdot 2 = 9{,}2 \cdot 10^9 \text{ Дж}.$$

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 λ:

$$\lambda = R/E^{1/3} = 100 \cdot 150/(9{,}2 \cdot 10^9)^{1/3} = 7{,}16.$$

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

амплитуда фазы давления

$$\Delta P_+/P_0 = 0{,}064 \text{ или } \Delta P_+ = 6{,}5 \cdot 10^3 \text{ Па при } P_0 = 101\,325 \text{ Па};$$

амплитуда фазы разрежения

$$\Delta P_-/P_0 = 0{,}02 \text{ или } \Delta P_- = 2 \cdot 10^3 \text{ Па при } P_0 = 101\,325 \text{ Па};$$

длительность фазы сжатия

$$\tau_+ = 0{,}0509 \text{ с};$$

длительность фазы разрежения

$$\tau_- = 0{,}127 \text{ с};$$

импульсы фаз сжатия и разрежения

$$I_+ \approx I_- = 126{,}4 \text{ Па·с}.$$

Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения в

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ. 2010

наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением

$$\Delta P(t) = 6{,}5\cdot 10^3(\sin(\pi(t - 0{,}0509)/0{,}1273)/\sin(-\pi\ 50{,}9/0{,}1273))\times$$
$$\times\exp(-0{,}6t/0{,}0509).$$

Используя полученные значения ΔP_+ и I_+, по формулам п.4 имеем:

$$Pr_1 = 2{,}69;\ Pr_2 = 1{,}69;\ Pr_3 = -11{,}67;\ Pr_4 = 0{,}76;\ Pr_5 = -13{,}21$$

(при расчете Pr_3 предполагается, что масса человека 80 кг).

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

$$\Delta P_{r+}/P_0 = 0{,}14 \text{ или } \Delta P_{r+} = 1{,}4\cdot 10^4 \text{ Па при } P_0 = 101325 \text{ Па};$$

амплитуда отраженной волны разрежения

$$\Delta P_{r-}/P_0 = 0{,}174 \text{ или } \Delta P_{r-} = 1{,}74\cdot 10^4 \text{ Па при } P_0 = 101325 \text{ Па};$$

длительность отраженной волны давления

$$\tau_{r+} = 0{,}0534 \text{ с};$$

длительность отраженной волны разрежения

$$\tau_{r-} = 0{,}1906 \text{ с};$$

импульсы отраженных волн давления и разрежения:

$$I_{r+} = 308 \text{ Па·с};$$

$$I_{r-} = 284{,}7 \text{ Па·с}.$$

Форма отраженной волны при взаимодействии со стенкой

$$\Delta P_r(t) = 1{,}4\cdot 10^4(\sin(\pi(t - 0{,}0534)/0{,}1906)/\sin(-\pi 0{,}0534/0{,}1906))\times$$
$$\times\exp(-0{,}8906t/0{,}0534).$$

Используя полученные значения ΔP_+ и I_+, по формулам п. 4 имеем:

$$Pr_1 = 4{,}49;\ Pr_2 = 3{,}28;\ Pr_3 = -7{,}96;\ Pr_4 = 1{,}95;\ Pr_5 = -9{,}35.$$

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ 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., pp. 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.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2010

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.: РАО «Газпром», 1996.

15. ПБ 09-540–03. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (приложение 1). Утверждены Постановлением Госгортехнадзора России от 05.05.03 № 29.

16. ПБ 09-540–03. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (приложение 2). Утверждены Постановлением Госгортехнадзора России от 05.05.03 № 29.

По вопросам приобретения
нормативно-технической документации
обращаться по тел./факсам:
(495) 620-47-53, 984-23-56, 984-23-57, 984-23-58, 984-23-59
E-mail: gost.e-ecolog.ru

Подписано в печать 27.09.2010. Формат 60×84 1/16.
Гарнитура Times. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Объем 13,0 печ. л.
Заказ № 464.
Тираж 40 экз.

Закрытое акционерное общество
«Научно-технический центр исследований
проблем промышленной безопасности»
105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 21

Отпечатано в ООО «Полимедиа»
105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 18, стр. 1

gost.e-ecolog.ru