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



Серия 27

Декларирование промышленной безопасности и оценка риска

Выпуск 9

РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ «МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ»

2015

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 9

РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ «МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ»

Москва
ЗАО НТЦ ПБ
2015

ББК 30н
Р84

Р84 **Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». Серия 27. Выпуск 9.** — М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015. — 44 с.

ISBN 978-5-9687-0667-6.

Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» разработано в целях содействия соблюдению требований федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» и «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта».

В разработке Руководства по безопасности принимали участие А.С. Печеркин, М.В. Лисанов, Д.В. Дегтярев, А.А. Агапов, Е.А. Агапова, А.С. Софьин (ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности»), С.И. Сумской (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»), С.А. Жулина, В.В. Козельский, Г.М. Селезнев, И.С. Ясинский (Ростехнадзор).

Руководство содержит рекомендации по оценке параметров воздушных ударных волн при взрывах топливно-воздушных смесей, образующихся в атмосфере при промышленных авариях, определению вероятных степеней поражения людей и степени повреждений зданий от взрывной нагрузки при авариях со взрывами облаков таких смесей.

ББК 30н

ISBN 978-5-9687-0667-6



© Оформление. Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 апреля 2015 г. № 159 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» 4
Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» 5
I. Общие положения 5
II. Общие рекомендации по оценке последствий взрывов ТВС 6
III. Рекомендации по определению основных параметров взрыва ТВС 7
IV. Рекомендации по определению дополнительных характеристик взрыва ТВС 13
V. Оценка поражающего воздействия 16
Приложение № 1. Список сокращений 23
Приложение № 2. Термины и определения 25
Приложение № 3 28
Приложение № 4 30
Приложение № 5. Примеры расчетов последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей 32

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ (РОСТЕХНАДЗОР)

ПРИКАЗ

20 апреля 2015 г. № 159

Москва

Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей»

В целях реализации Положения о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. № 401, п р и к а з ы в а ю :

1. Утвердить прилагаемое Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей».

2. Считать не подлежащим применению постановление Федерального горного и промышленного надзора России от 26 июня 2001 г. № 25 «Об утверждении «Методики оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (РД 03-409–01).

Руководитель **А.В. Алёшин**

Приложение

РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ
«Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей»

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (далее — Руководство) разработано в целях содействия соблюдению требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденных приказом Ростехнадзора от 11 марта 2013 г. № 96 (зарегистрирован Минюстом России 16 апреля 2013 г., регистрационный № 28138) (далее — Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»), и требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта», утвержденных приказом Ростехнадзора от 15 июля 2013 г. № 306 (зарегистрирован Минюстом России 20 августа 2013 г., регистрационный № 29581) (далее — Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта»).

2. Настоящее Руководство содержит рекомендации к оценке параметров воздушных ударных волн при взрывах топливно-воздушных смесей, образующихся в атмосфере при промышленных авариях, для обеспечения требований промышленной безопасности при проектировании, строительстве, капитальном ремонте, техническом перевооружении, реконструкции, эксплуатации,

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

консервации и ликвидации опасных производственных объектов, и не является нормативным правовым актом. Руководство содержит рекомендации по определению вероятных степеней поражения людей и степени повреждений зданий от взрывной нагрузки при авариях со взрывами облаков ТВС.

3. Организации, осуществляющие оценку последствий аварий со взрывом топливно-воздушных смесей, могут использовать иные обоснованные способы и методы, чем те, которые указаны в настоящем Руководстве.

4. В Руководстве используются сокращения, обозначения, а также термины и определения, приведенные в приложениях № 1 и 2 к настоящему Руководству.

5. Руководство распространяется на опасные производственные объекты, на которых возможны случаи аварии, сопровождающиеся взрывами облаков ТВС.

II. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВОВ ТВС

6. 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.

7. В образовании облака ТВС рекомендуется рассматривать горючее вещество одного вида, в противном случае (для смеси нескольких горючих веществ) характеристики ТВС, используемые при расчетах параметров ударных волн, определяются отдельно.

8. Для расчета параметров ударных волн при взрыве облака ТВС рекомендуется учитывать следующие исходные данные:

а) характеристики горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС;

б) агрегатное состояние ТВС (газовое или гетерогенное);

в) средняя концентрация горючего вещества в смеси $c_г$;

г) стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом $c_{ст}$;

д) масса горючего вещества, содержащегося в облаке[1], $M_г$ (если эта величина неизвестна, то ее расчет рекомендуется проводить согласно приложению № 3 к Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»);

е) удельная теплота сгорания горючего вещества $q_г$;

ж) информация об окружающем пространстве.

9. В качестве основных структурных элементов алгоритма расчетов (рис. 3-1 приложения № 3 к настоящему Руководству) рекомендуется рассматривать:

а) определение массы горючего вещества, содержащегося в облаке;

б) определение эффективного энергозапаса ТВС;

в) определение ожидаемого режима взрывного превращения ТВС;

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

д) определение дополнительных характеристик взрывной нагрузки;

е) оценка поражающего воздействия взрыва ТВС.

III. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТВС

Определение эффективного энергозапаса ТВС

10. Эффективный энергозапас горючей смеси определяется по соотношению:

[1] Более точно: масса горючего вещества в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, $M_г$ (*Примеч. изд.*)

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

$$E = M_г q_г \text{ при } c_г \le c_{ст} \quad (1)$$

или

$$E = M_г q_г c_{ст}/c_г \text{ при } c_г > c_{ст}.$$

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

$$V = M_г/c_{ст}. \quad (2)$$

12. Массу, участвующую во взрыве для дрейфующего облака, рекомендуется определять на момент времени, когда взрывоопасный объем дрейфующего облака достигает источников возможного воспламенения или если распределение источников воспламенения по территории неизвестно, то на момент времени, когда взрывоопасная масса при дрейфе достигает своего максимального значения. Определение массы, участвующей во взрыве для дрейфующего облака, рекомендуется выполнять в соответствии с Руководством по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утвержденным приказом Ростехнадзора от 20 апреля 2015 г. № 159.

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 $c_г$ в соотношении (1) принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа.

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

Корректировочный параметр β для наиболее распространенных в промышленном производстве опасных веществ определяется из табл. 4-1.

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 Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтеперерабатывающих производств».

Определение ожидаемого режима взрывного превращения

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

13. ТВС, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своим взрывоопасным свойствам разделены на четыре класса. Классификация горючих веществ приведена в табл. 4-1 приложения № 3 к настоящему Руководству.

В случае если вещество отсутствует в табл. 4-1, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в таблице веществами, а при отсутствии информации о свойствах данного вещества – относить его к классу 1, то есть рассматривать как наиболее опасный случай.

Классификация окружающей территории

14. В связи с тем, что характер окружающего пространства в значительной степени определяет скорость взрывного превращения облака ТВС, рекомендуется параметры ударной волны, геометрические характеристики окружающего пространства разделять 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.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

Классификация ожидаемого режима взрывного превращения

15. Известны два основных режима протекания быстропротекающих процессов – детонация и дефлаграция. 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.

16. Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения определяется с помощью табл. 1 в зависимости от класса горючего вещества и вида окружающего пространства. Допускается использование более точных значений скорости взрывного превращения при их обосновании.

Таблица 1

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

17. 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:

$$V_г = k_1 M_г^{1/6}, \quad (3)$$

где k_1 — константа, равная 43.

Диапазон 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_г = k_2 M_г^{1/6}, \quad (4)$$

где k_2 — константа, равная 26.

Оценка агрегатного состояния ТВС

18. 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.

Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн

19. 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.

Детонация газовых и гетерогенных ТВС

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

$$R_x = r/(E/P_0)^{1/3}. \quad (5)$$

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

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

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

22. В случае детонации облака газовой ТВС расчет производится по следующим формулам:

$$\ln(P_x) = -1{,}124 - 1{,}66\ln(R_x) + 0{,}26\,(\ln(R_x))^2 \pm 10\ \%; \qquad (6)$$

$$\ln(I_x) = -3{,}4217 - 0{,}898\ln(R_x) - 0{,}0096\,(\ln(R_x))^2 \pm 15\ \%. \qquad (7)$$

Зависимости (6) и (7) справедливы для значений R_x, больших величины $R_к = 0{,}2$ и меньших $R_к = 24$.[2] В случае $R_x < 0{,}2$ величина P_x полагается равной 18, а в выражение (7) подставляется значение $R_x = 0{,}142$.

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

$$P_x = 0{,}125/R_x + 0{,}137/R_x^2 + 0{,}023/R_x^3 \pm 10\ \%; \qquad (8)$$

$$I_x = 0{,}022/R_x \pm 15\ \%. \qquad (9)$$

Зависимости (8) и (9) справедливы для значений R_x больших величины $R_к = 0{,}25$. В случае если $R_x < R_к$, величина P_x полагается равной 18, а величина $I_x = 0{,}16$.

Дефлаграция газовых и гетерогенных ТВС

24. В случае дефлаграционного взрывного превращения облака ТВС к параметрам, влияющим на величины избыточного давления и импульса положительной фазы, добавляются скорость видимого фронта пламени ($V_г$) и степень расширения продуктов сгорания (σ). 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 $(\sigma - 1)/\sigma$.

[2] Более точно принимать $R_к = 6{,}5$. (*Примеч. изд.*)

25. Безразмерные давление P_{x1} и импульс фазы сжатия I_{x1} определяются по соотношениям:

$$P_{x1} = (V_г/C_0)^2((\sigma - 1)/\sigma)(0{,}83/R_x - 0{,}14/R_x^2); \quad (10)$$

$$I_{x1} = (V_г/C_0)((\sigma - 1)/\sigma)(1 - 0{,}4(\sigma - 1)V_г/\sigma C_0)\times \times(0{,}06/R_x + 0{,}01/R_x^2 - 0{,}0025/R_x^3). \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) справедливы для значений R_x, больших величины $R_{кр} = 0{,}34$, в противном случае вместо R_x в соотношения (10) и (11) подставляется величина $R_{кр}$.

26. Далее вычисляются величины P_{x2} и I_{x2}, которые соответствуют режиму детонации и для случая детонации газовой смеси рассчитываются по соотношениям (6), (7), а для детонации гетерогенной смеси – по соотношениям (8), (9). Окончательные значения P_x и I_x выбираются из условий:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}); \; I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}). \quad (12)$$

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

$$\Delta P = P_x P_0; \quad (13)$$

$$I = I_x(P_0)^{2/3}E^{1/3}/C_0. \quad (14)$$

IV. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВА ТВС

Профиль ударной волны

28. Характерный профиль ударной волны при взрыве ТВС показан на рис. 1.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

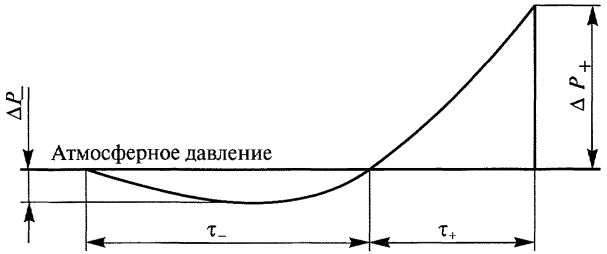


Рис.1. Характерный профиль ударной волны

В пунктах 29–35 показано, как определяются количественные характеристики дополнительных параметров ударной волны.

Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси

29. Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси рассчитываются по следующим соотношениям[3]:

Амплитуда фазы сжатия:

$$\ln(\Delta P_+/P_0) = 0{,}299 - 2{,}058\ln\lambda_{пар} + 0{,}26(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (15)$$

Амплитуда фазы разрежения:

$$\ln(\Delta P_-/P_0) = -1{,}46 - 1{,}402\ln\lambda_{пар} + 0{,}079(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (16)$$

Длительность фазы сжатия:

$$\ln(10^5\tau_+/E^{1/3}) = 0{,}106 + 0{,}448\ln\lambda_{пар} - 0{,}026(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (17)$$

Длительность фазы разрежения:

$$\ln(10^5\tau_-/E^{1/3}) = 1{,}299 + 0{,}412\ln\lambda_{пар} - 0{,}079(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (18)$$

Импульс фазы сжатия:

$$\ln(I_+/E^{1/3}) = -0{,}843 - 0{,}932\ln\lambda_{пар} - 0{,}037(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (19)$$

Импульс фазы разрежения:

$$\ln(I_-/E^{1/3}) = -0{,}873 - 1{,}25\ln\lambda_{пар} + 0{,}132(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (20)$$

[3] Соотношения 15–20 справедливы при $1{,}3 \le \lambda_{пар} \le 14$. *(Примеч. изд.)*

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

$$\Delta P(t, \lambda_{пар}) = \Delta P_{+}(\sin(\pi(t - \tau_{+})/\tau_{-})/\sin(-\pi\tau_{+}/\tau_{-}))\exp(-K_i t/\tau_{+}). \quad (21)$$

31. Декремент затухания в падающей волне рассчитывается по соотношению:

$$K_i = 0{,}889 - 0{,}356\ln\lambda_{пар} + 0{,}105(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (22)$$

Параметры отраженной ударной волны

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

Амплитуда отраженной волны давления:

$$\ln(\Delta P_{r+}/P_0) = 1{,}264 - 2{,}056\ln\lambda_{пар} + 0{,}211(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (23)$$

Амплитуда отраженной волны разрежения:

$$\ln(\Delta P_{r-}/P_0) = -0{,}673 - 1{,}043\ln\lambda_{пар} + 0{,}252(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (24)$$

Длительность отраженной волны давления:

$$\ln(10^5\tau_{r+}/E^{1/3}) = -0{,}109 + 0{,}983\ln\lambda_{пар} - 0{,}23(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (25)$$

Длительность отраженной волны разрежения:

$$\ln(10^5\tau_{r-}/E^{1/3}) = 1{,}265 + 0{,}857\ln\lambda_{пар} - 0{,}192(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (26)$$

Импульс отраженной волны давления:

$$\ln(I_{r+}/E^{1/3}) = -0{,}07 - 1{,}033\ln\lambda_{пар} + 0{,}045(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (27)$$

Импульс отраженной волны разрежения:

$$\ln(I_{r-}/E^{1/3}) = -0{,}052 - 0{,}462\ln\lambda_{пар} - 0{,}27(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (28)$$

Общее время действия отраженных волн на мишень:

$$\ln(10^5(\tau_{r+} + \tau_{r-})/E^{1/3}) = 1{,}497 + 0{,}908\ln\lambda_{пар} - 0{,}404(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (29)$$

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

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

$$\Delta P_r(t, \lambda_{пар}) = \Delta P_{r+} (\sin(\pi(t - \tau_{r-})/\tau_{r-})/\sin(-\pi\tau_{r+})/\tau_{r-}))\exp(-K_r t/\tau_{r+}). \quad (30)$$

34. Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению:

$$K_r = 0{,}978 - 0{,}554\ln\lambda_{пар} + 0{,}26(\ln\lambda_{пар})^2. \quad (31)$$

Соотношения (15)–(31) справедливы при значениях $\lambda_{пар}$ до 51,6.

Параметры волны при произвольном режиме сгорания

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

V. ОЦЕНКА ПОРАЖАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

36. 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[4] 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] См. рис. 2. (*Примеч. изд.*)

Оценка вероятности повреждений промышленных зданий от взрыва облака ТВС

37. Вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, может оцениваться по соотношению:

$$\mathrm{Pr}_1 = 5 - 0{,}26 \ln V_1. \qquad (32)$$

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

$$V_1 = (17500/\Delta P)^{8{,}4} + (290/I)^{9{,}3}. \qquad (33)$$

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

$$\mathrm{Pr}_2 = 5 - 0{,}22 \ln V_2. \qquad (34)$$

В этом случае фактор V_2 рассчитывается по формуле:

$$V_2 = (40000/\Delta P)^{7{,}4} + (460/I)^{11{,}3}. \qquad (35)$$

На рис. 2 приведена P-I диаграмма, соответствующая различным значениям поражения зданий ударной волной при взрыве облака ТВС.

Оценка вероятности поражения людей при взрыве облака ТВС

В пунктах 39–41 приводятся соотношения, которые могут быть использованы для расчета уровня вероятности поражения воздушной волной живых организмов (в том числе и человека).

39. 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:

$$\mathrm{Pr}_3 = 5 - 5{,}74 \ln V_3. \qquad (36)$$

Фактор опасности V_3 рассчитывается по соотношению

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

$$V_3 = 4{,}2/\bar{p} + 1{,}3/\bar{i}. \quad (37)$$

Безразмерное давление и безразмерный импульс задаются выражениями:

$$\bar{p} = 1 + \Delta P/P_0 \text{ и } \bar{i} = I/(P_0^{1/2}\, m^{1/3}), \quad (38)$$

где m — масса тела живого организма, кг.

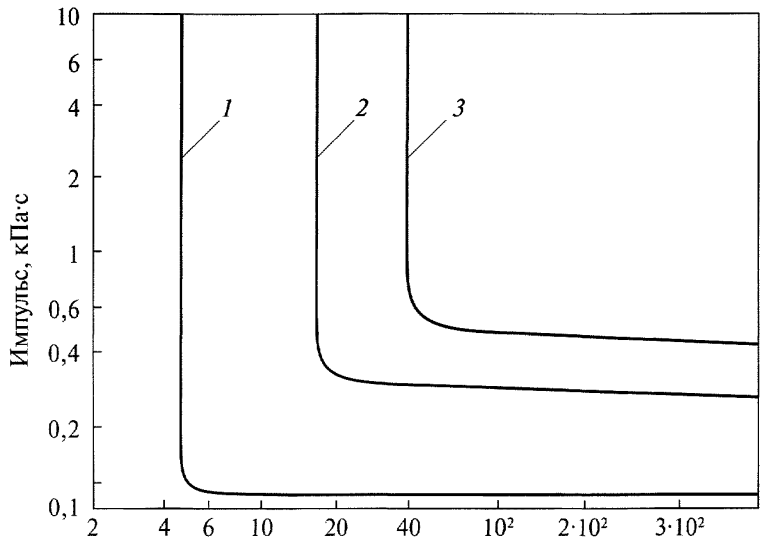


Рис. 2. P-I диаграмма для оценки уровня разрушения промышленных зданий:
1 — граница минимальных разрушений; *2* — граница значительных повреждений; *3* — разрушение зданий (50–75 % стен разрушено)

На рис. 3 приведена P-I диаграмма, соответствующая различным значениям вероятности поражения людей, попавших в зону действия взрыва.

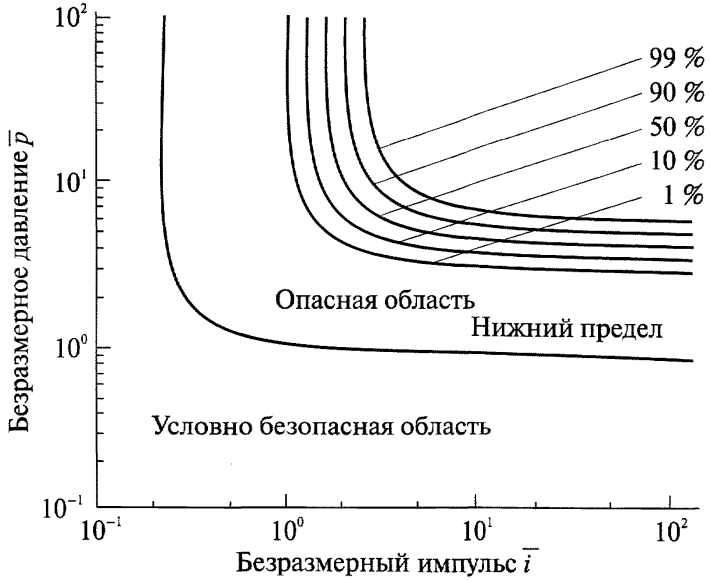


Рис. 3. P-I диаграмма для экспресс-оценки поражения людей от взрыва ТВС

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

$$\mathrm{Pr}_4 = -12{,}6 + 1{,}524 \ln \Delta P. \qquad (39)$$

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

$$\mathrm{Pr}_5 = 5 - 2{,}44 \ln V_5. \qquad (40)$$

Здесь фактор V_5 рассчитывается из соотношения

$$V_5 = 7{,}38 \cdot 10^3/\Delta P + 1{,}3 \cdot 10^9/(\Delta P I). \qquad (41)$$

Связь функции Pr_i с вероятностью той или иной степени поражения находится по табл. 2.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

Таблица 2

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

Оценка радиусов зон поражения

42. Для определения радиусов зон поражения может быть использован следующий метод, который состоит в численном решении уравнения:

$$k/(\Delta P(r) - P^*) = I(r) - I^*, \qquad (42)$$

причем константы k, P^*, I^* зависят от характера зоны поражения и определяются из табл. 3, а функции $P(r)$ и $I(r)$ находятся по соотношениям (8)–(14) соответственно.

Таблица 3

Константы для определения радиусов зон поражения при взрывах ТВС

Характеристика действия ударной волны	I^*, Па·с	P^*, Па	k, Па²·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

Характеристика действия ударной волны	I^*, Па·с	P^*, Па	k, Па^2·с
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 смертельн. поражения людей маловероятны)	100	65 900	$1{,}62\cdot10^7$

43. Для оценки последствий взрывов ТВС допускается применять формулу для определения радиусов зон поражения:

$$r = KW^{1/3}/(1 + (3180/W)^2)^{1/6}, \qquad (43)$$

где коэффициент K определяется согласно табл. 4, а W – тротиловый эквивалент взрыва, определяемый из соотношения:

$$W = \frac{0{,}4}{0{,}9}\frac{M_г q_г}{4{,}5\cdot10^6}, \qquad (44)$$

где $q_г$ – теплота сгорания газа.

Таблица 4

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

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

Категория повреждения	Характеристика повреждения здания	Избыточное давление ΔP, кПа	Коэффициент K
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

44. Для определения радиуса смертельного поражения человека в соотношение (43) следует подставлять величину $K = 3{,}8$.

Примеры расчетов последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей приведены в приложении № 5 к настоящему Руководству.

Приложение № 1
к Руководству

Список сокращений

В настоящем Руководстве используются следующие обозначения и сокращения:

ТВС – топливно-воздушная смесь;

ШФЛУ – широкая фракция легких углеводородов;

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*– кэффициент уравнения;

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;

$\bar{I}_x$ — безразмерный импульс фазы сжатия;

K — коэффициент уравнения;

k — коэффициент уравнения;

K_i — декремент затухания;

K_r — декремент изменения давления в отраженной волне;

$M_г$ — масса горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС, кг;

$\bar{p}$ – безразмерное давление;

P* — коэффициент уравнения;

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;

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

P_0 — атмосферное давление, Па;

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_x — безразмерное расстояние от центра облака ТВС;

$R_{кр}$ — пороговое значение величины R_x;

$V_г$ — 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;

β — корректировочный параметр, характеризующий фугасные свойства ТВС;

$\lambda_{пар}$ — параметрическое расстояние;

σ — 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.

Приложение № 2
к Руководству

Термины и определения

В настоящем Руководстве применены следующие термины с соответствующими определениями:

авария — разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ (статья 1 к Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»);

анализ риска аварии — процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды;

взрыв — неконтролируемый быстропротекающий процесс выделения энергии, связанный с физическим, химическим или физико-химическим изменением состояния вещества, приводящий к резкому динамическому повышению давления или возникновению ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов, способных привести к разрушительным последствиям;

дефлаграция (дефлаграционный взрыв) — взрыв, при котором нагрев и воспламенение последующих слоев взрывчатого вещества происходит в результате диффузии и теплоотдачи, характеризующийся тем, что фронт ударной волны и фронт пламени движутся с дозвуковой скоростью;

идентификация опасностей аварии — процесс выявления и признания, что опасности аварии на опасном производственном объекте существуют, и определения их характеристик;

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

обоснование безопасности — документ, содержащий сведения о результатах оценки риска аварии на опасном производственном объекте и связанной с ней угрозы, условия безопасной эксплуатации опасного производственного объекта, требования к эксплуатации, капитальному ремонту, консервации и ликвидации опасного производственного объекта (статья 1 к Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»);

опасность аварии — угроза, возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде вследствие аварии на опасном производственном объекте. Опасности аварий на опасных производственных объектах связаны с возможностью разрушения сооружений и (или) технических устройств, взрывом и (или) выбросом опасных веществ с последующим причинением ущерба человеку, имуществу и (или) нанесением вреда окружающей природной среде;

опасные вещества — воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества и вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды, указанные в приложении 1 к Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»;

оценка риска аварии — процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и (или) окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания;

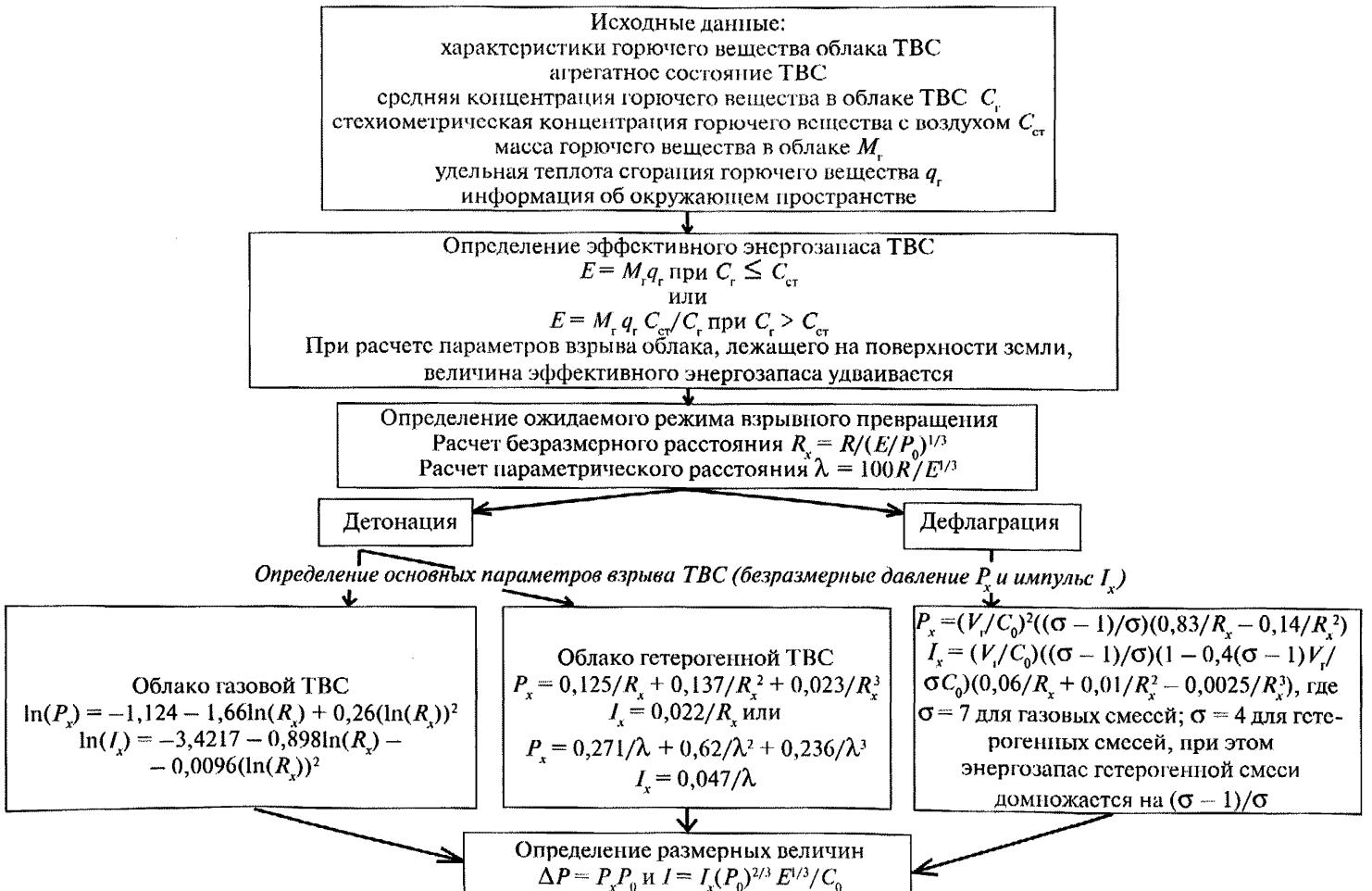
риск аварии — мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий;

сценарий аварии — последовательность отдельных логически связанных событий, обусловленных конкретным инициирующим (исходным) событием, приводящих к определенным опасным последствиям аварии.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

Приложение № 3

к Руководству



© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

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

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

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

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. 3-1. Алгоритм расчета последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей

Приложение 4
к Руководству
Таблица 4-1

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
	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
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

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
	β		β		β		β
		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		
				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, 2015

Приложение № 5
к Руководству

Примеры расчетов последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей

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 — газовое;

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 табл. 1 определяем ожидае-

мый 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 (3):

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

Полученная величина меньше максимальной скорости диапазона данного взрывного превращения.

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

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

Рассчитываем параметры взрыва при скорости горения 200 м/с. Для вычисленного безразмерного расстояния по соотношениям (10) и (11) 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 (6) и (7):

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

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

Согласно (12) определяем окончательные значения P_x и I_x:

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

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

Из найденных безразмерных величин P_x и I_x вычисляем согласно (13) и (14) искомые величины избыточного давления и импуль-

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

са фазы сжатия в воздушной ударной волне на расстоянии 100 м от места аварии при скорости горения 200 м/с:

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

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

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_3 предполагается, что масса человека 80 кг).

Это согласно табл. 2 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.

На рис. 5-1 приведены зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС.

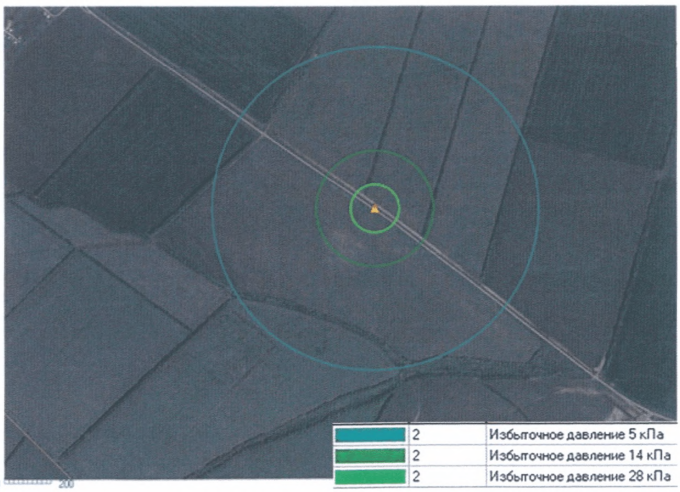


Рис. 5-1. Зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС

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 — газовое;

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. 1 определяем диапазон ожидаемого режима взрывного превращения облака топливно-воздушной смеси — первый, что соответствует детонации.

Для заданного расстояния 150 м определяем безразмерное параметрическое расстояние $\lambda_{пар}$:

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

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

По соотношениям для падающей волны (15)–(20) находим:
амплитуда фазы давления:

$$\Delta P_+/P_0 = 0{,}064 \text{ или } \Delta P_+ = 6{,}5\cdot10^3 \text{ Па при } P_0 = 101325 \text{ Па};$$

амплитуда фазы разрежения:

$$\Delta P_-/P_0 = 0{,}02 \text{ или } \Delta P_- = 2\cdot10^3 \text{ Па при } P_0 = 101325 \text{ Па};$$

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 наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением:

$$\Delta P(t) = 6{,}5\cdot10^3(\sin(\pi(t - 0{,}0509)/0{,}1273)/\sin(-\pi\ 50{,}9/0{,}1273))\times \times\exp(-0{,}6t/0{,}0509).$$

Используя полученные значения ΔP_+ и I_+, по формулам раздела V 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. 2 означает 1 % вероятность разрушений производственных зданий. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.
По соотношениям для отраженной волны (23)–(28) находим:
амплитуда отраженной волны давления

$$\Delta Pr_+/P_0 = 0{,}14 \text{ или } \Delta Pr_+ = 1{,}4\cdot10^4 \text{ Па при } P_0 = 101325 \text{ Па};$$

амплитуда отраженной волны разрежения

$\Delta Pr_/P_0 = 0{,}174$ или $\Delta Pr_ = 1{,}74 \cdot 10^4$ Па при $P_0 = 101325$ 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

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

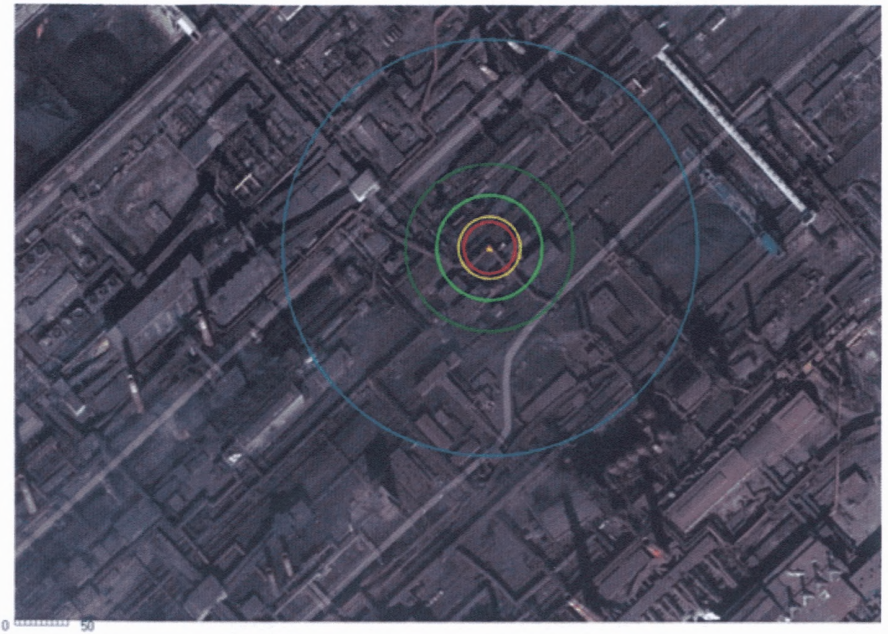
Используя полученные значения ΔP_+ и I_+, по формулам раздела V имеем:

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

Это согласно табл. 2 означает вероятности: 30 % повреждений и 4 % разрушений производственных зданий. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

На рис. 5-2 приведены зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015



1		2	Избыточное давление 5 кПа
2		2	Избыточное давление 14 кПа
3		2	Избыточное давление 100 кПа
4		2	Избыточное давление 70 кПа
5		2	Избыточное давление 28 кПа

Рис. 5-2. Зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС

Пример 3

В резервуаре вместимостью 2000 м^3 находится пропан в газовой фазе при температуре окружающей среды 24,5 °С и давлении 2 атм. Резервуар расположен на товарно-сырьевой базе в равнинной местности. Происходит разрушение емкости и выбрасывается все опасное вещество. Метеоусловия: скорость ветра 3,2 м/с, класс устойчивости атмосферы — устойчивая стратификация. Требуется определить зоны поражения ударной волной при взрыве облака ТВС.

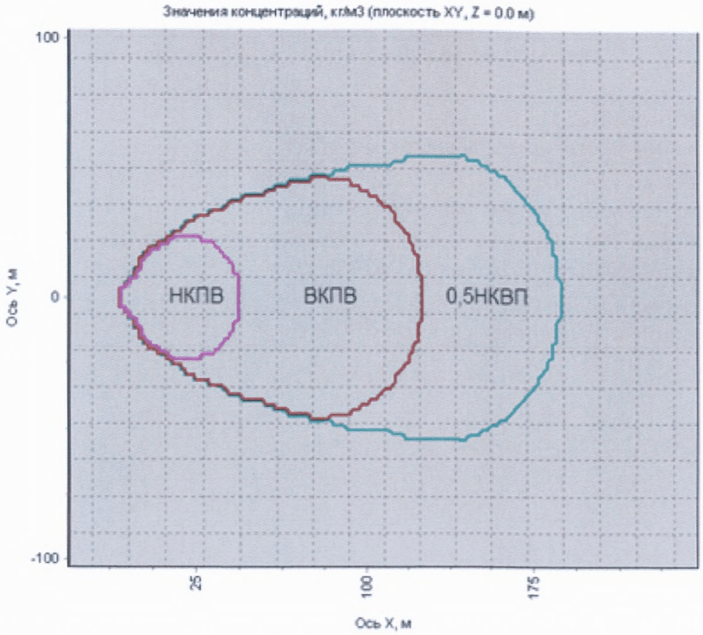


Рис. 5-3. Сечение зоны, ограниченной НКПВ, 0,5НКПВ и ВКПВ плоскостью $z = 0$ (в направлении по ветру) при выбросе пропана

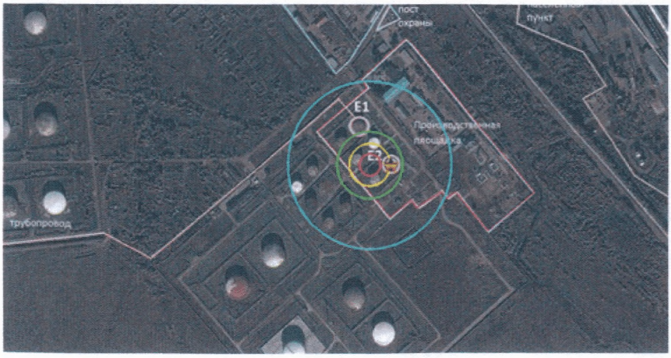


Рис. 5-4. Зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2015

Таблица № 5-1

№ п/п	Наименование изолинии	Радиус изолинии, м	Цвет изолинии
1	Взрыв ТВС: Пропан $M = 622{,}00$ кг, поражение избыточным давлением 5 кПа	732,44	
2	Взрыв ТВС: Пропан $M = 622{,}00$ кг, поражение избыточным давлением 14 кПа	294,09	
3	Взрыв ТВС: Пропан $M = 622{,}00$ кг, поражение избыточным давлением 28 кПа	184,64	
4	Взрыв ТВС: Пропан $M = 622{,}00$ кг, поражение избыточным давлением 70 кПа	93,64	

По вопросам приобретения
нормативно-технической документации
обращаться по тел./факсу
(495) 620-47-53 (многоканальный)
E-mail: gost.e-ecolog.ru

Подписано в печать 18.09.2015. Формат 60×84 1/16.
Гарнитура Times. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Объем 2,75 печ. л.
Заказ № 897.
Тираж 40 экз.

Подготовка оригинал-макета и печать
Закрытое акционерное общество
«Научно-технический центр исследований
проблем промышленной безопасности»
105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14

gost.e-ecolog.ru