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



Серия 27

Декларирование промышленной безопасности и оценка риска

Выпуск 15

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

2016

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 15

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

Москва
ЗАО НТЦ ПБ
2016

ББК 30н
Р84

Р84 **Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». Серия 27. Выпуск 15.** — М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015. — 44 с.

ISBN 978-5-9687-0706-2.

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» на основе и взамен аналогичного документа, утвержденного приказом Ростехнадзора от 20.04.2015 № 159.

В разработке Руководства принимали участие С.Г. Радионова, Б.А. Красных, С.А. Жулина, В.В. Козельский, Г.М. Селезнев, И.С. Ясинский (Ростехнадзор), 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»).

Руководство содержит рекомендации к оценке параметров воздушных ударных волн при взрывах топливно-воздушных смесей, образующихся в атмосфере при промышленных авариях, для обеспечения выполнения требований промышленной безопасности при проектировании, строительстве, капитальном ремонте, техническом перевооружении, реконструкции, эксплуатации, консервации и ликвидации опасных производственных объектов нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности, и рекомендации по определению вероятных степеней поражения людей и степени повреждений зданий от взрывной нагрузки при авариях со взрывами облаков таких смесей.

ББК 30н

ISBN 978-5-9687-0706-2



© Оформление. Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 марта 2016 г. № 137 «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 параметров взрыва ТВС 13

V. Оценка поражающего воздействия 16

Приложение № 1. Список обозначений и сокращений 19

Приложение № 2. Термины и определения 21

Приложение № 3. Рисунки и таблицы 22

Приложение № 4. Примеры расчетов последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей 30

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

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

ПРИКАЗ

31 марта 2016 г. № 137

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, приказываю:

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

2. Признать утратившим силу 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».

Руководитель **А.В. Алёшин**

Утверждено
приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от 31 марта 2016 г. № 137

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 по безопасности) 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 (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 (далее — Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта»*).

2. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации к оценке параметров воздушных ударных волн при взрывах топливно-воздушных смесей, образующихся в атмосфере при

* Далее не упоминаются. (*Примеч. изд.*)

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

промышленных авариях, для обеспечения требований промышленной безопасности при проектировании, строительстве, капитальном ремонте, техническом перевооружении, реконструкции, эксплуатации, консервации и ликвидации опасных производственных объектов и не является нормативным правовым актом. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации по определению вероятных степеней поражения людей и степени повреждений зданий от взрывной нагрузки при авариях со взрывами облаков топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах.

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

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

II. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВОВ ТВС

5. 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.

6. В образовании облака ТВС рекомендуется рассматривать горючее вещество одного вида, а для смеси нескольких горючих веществ характеристики ТВС, используемые при расчетах параметров ударных волн, определяются отдельно.

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

характеристики горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС;

агрегатное состояние ТВС (газовое или гетерогенное);

средняя концентрация горючего вещества в смеси $c_г$;

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

масса горючего вещества в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, $M_г$;

удельная теплота сгорания горючего вещества $q_г$;

информация об окружающем пространстве.

8. В качестве основных структурных элементов алгоритма расчета последствий аварийных взрывов ТВС (рисунок 1 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности) рекомендуется рассматривать:

определение массы горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС;

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;

оценку поражающего воздействия взрыва ТВС.

III. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТВС

Определение эффективного энергозапаса ТВС

9. Эффективный энергозапас горючей смеси определяется по соотношению

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

© Оформление ЗАО НТЦ ПБ, 2016

или

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

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

$$V = M_г/c_{ст}. \quad (2)$$

11. Массу, участвующую во взрыве для дрейфующего облака ТВС, рекомендуется определять на момент времени, когда взрывоопасный объем дрейфующего облака достигает источников возможного воспламенения, или, если распределение источников воспламенения по территории неизвестно, на момент времени, когда взрывоопасная масса при дрейфе достигает своего максимального значения. Определение массы, участвующей во взрыве для дрейфующего облака ТВС, рекомендуется выполнять в соответствии с Руководством по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утвержденным приказом Ростехнадзора от 20 апреля 2015 г. № 158.

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

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.

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 по таблице № 1 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности.

Определение ожидаемого режима взрывного превращения

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

12. ТВС, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своим взрывоопасным свойствам разделены на четыре класса. Классификация горючих веществ по степени чувствительности приведена в таблице № 1 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности.

В случае, если вещество отсутствует в таблице № 1 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в данной 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

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

Вид 1. Наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно формирование турбулентных струй продуктов сгорания размером не менее трех размеров детонационной ячейки для данной смеси. Если размер детонационной ячейки для данной смеси неизвестен, то минимальный характерный размер турбулентных струй рекомендуется принимать 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.

© Оформление ЗАО НТЦ ПБ, 2016

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

Вид 4. Слабо загроможденное и свободное пространство.

Классификация ожидаемого режима взрывного превращения

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

15. Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения определяется с помощью таблицы № 2 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности в зависимости от класса горючего вещества и вида окружающего пространства. Допускается использование более точных значений скорости взрывного превращения при их обосновании.

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

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

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

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

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

Диапазон 5. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением

$$V_г = k_1 M_г^{1/6}, \quad (3)$$

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

17. Для дальнейших расчетов необходимо оценить агрегатное состояние топлива в смеси. Предполагается, что смесь гетерогенная, если более 50 % топлива содержится в облаке в виде капель, иначе ТВС считается газовой. Провести такие оценки можно исходя из величины давления насыщенных паров топлива при данной температуре и времени формирования облака. Для летучих веществ, таких, как пропан, при температуре 20 °С смесь можно считать газовой, а для веществ с низким давлением насыщенного пара (распыл дизельного топлива при 20 °С) расчеты проводятся в предположении гетерогенной ТВС.

Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн

18. 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

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

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

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

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

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

© Оформление ЗАО НТЦ ПБ, 2016

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

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

Зависимости (6) и (7) справедливы для значений R_x, больших величины $R_{кр} = 0{,}2$ и меньших $R_{кр} = 6{,}5$;

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

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

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

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

Дефлаграция газовых и гетерогенных ТВС

23. 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 σ принимается равной 7, для гетерогенных — равной 4. Для расчета параметров ударной волны при дефлаграции гетерогенных облаков величина эффективного энергозапаса смеси домножается на коэффициент $(\sigma - 1)/\sigma$.

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

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

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

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

25. 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:

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

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

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

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

IV. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТВС

Профиль ударной волны

27. Характерный профиль ударной волны при взрыве ТВС показан на рисунке 2 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности.

При определении количественных характеристик дополнительных параметров ударной волны необходимо пользоваться рекомендациями, указанными в пунктах 28–34 настоящего Руководства по безопасности.

Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси

28. Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси рассчитывают по следующим соотношениям (при $1{,}3 \le \lambda_{пар} \le 14$).

Амплитуда фазы сжатия:

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

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

Амплитуда фазы разрежения:

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

Длительность фазы сжатия:

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

Длительность фазы разрежения:

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

Импульс фазы сжатия:

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

Импульс фазы разрежения:

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

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

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

30. Декремент затухания в падающей волне рассчитывается по соотношению

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

Параметры отраженной ударной волны

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

Амплитуда отраженной волны давления:

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

Амплитуда отраженной волны разрежения:

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

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:

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

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

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

33. 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

34. Импульсные характеристики падающих и отраженных волн не зависят от скорости взрывного превращения, в связи с чем интенсивность и длительность действия ударных волн при $\lambda_{пар} \geq 1$ рассчитываются по соотношениям, указанным в пунктах 28–33 настоящего Руководства по безопасности. Возможность таких оценок основана на сравнении опытных данных с фактическими сведениями об авариях.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

V. ОЦЕНКА ПОРАЖАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

35. 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 P-I-диаграмме для оценки уровня разрушения промышленных зданий («импульс — давление») на рисунке 3 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности на две части (внутри — область разрушения, вне — область устойчивости) не имеет четкой границы. При приближении параметров волны к границе опасной области вероятность заданного уровня поражения нарастает от 0 до 100 %. При превышении известного уровня величин амплитуды давления и импульса достигается 100 %-ная вероятность поражения. Эти типичные особенности диаграмм поражения необходимо учитывать при отражении представления вероятности достижения того или иного уровня ущерба с помощью пробит-функции Pr_i.

Оценка вероятности повреждений промышленных зданий от взрыва облака ТВС

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

$$Pr_1 = 5 - 0{,}26 \ln V_1. \quad (32)$$

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

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

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

$$Pr_2 = 5 - 0{,}22 \ln V_2. \quad (34)$$

В этом случае фактор V_2 рассчитывается по формуле

$$V_2 = (40\,000/\Delta P)^{7{,}4} + (460/I)^{11{,}3}. \quad (35)$$

На рисунке 4 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности приведена P-I-диаграмма, соответствующая различным значениям поражения зданий ударной волной при взрыве облака ТВС.

Оценка вероятности поражения людей при взрыве облака ТВС

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

$$\Pr_3 = 5 - 5{,}74 \ln V_3. \qquad (36)$$

Фактор опасности V_3 рассчитывается по соотношению

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

Безразмерное давление и безразмерный импульс задаются выражениями

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

где m — масса тела живого организма, кг.

На рисунке 4 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности приведена P-I-диаграмма, соответствующая различным значениям вероятности поражения людей, попавших в зону действия взрыва.

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

$$\Pr_4 = -12{,}6 + 1{,}524 \ln \Delta P. \qquad (39)$$

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

$$\Pr_5 = 5 - 2{,}44 \ln V_5. \qquad (40)$$

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

Здесь фактор V_5 рассчитывается из соотношения

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

Связь вероятности поражения с пробит-функцией Pr_i с вероятностью той или иной степени поражения определяется по таблице № 3 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности.

Оценка радиусов зон поражения

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

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

причем константы k, P^*, I^* зависят от характера зоны поражения и определяются из таблицы № 4 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности, а функции $P(r)$ и $I(r)$ находятся по соотношениям (8)–(14) соответственно.

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

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

где коэффициент K уровня разрушения зданий определяется согласно таблице № 5 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности, а W — тротиловый эквивалент взрыва, определяемый из соотношения:

$$W = \frac{0{,}4}{0{,}9} \frac{M_r q_r}{4{,}5 \cdot 10^6}, \quad (44)$$

где q_r — теплота сгорания газа.

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

Примеры расчетов последствий аварийных взрывов ТВС приведены в приложении № 4 к настоящему Руководству по безопасности.

Приложение № 1

к Руководству по безопасности

Список сокращений и обозначений

В настоящем Руководстве по безопасности используются следующие обозначения и сокращения:

ВКПР — верхний концентрационный предел распространения пламени;

НЖПР — нижний концентрационный предел распространения пламени;

ТВС — топливно-воздушная смесь;

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^*- коэффициент 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;

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 в облаке ТВС, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, кг;

$\overline{p}$ — безразмерное давление;

P^* — коэффициент уравнения;

ΔP — избыточное давление, Па;

ΔP_+ — амплитуда волны давления, Па;

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

ΔP_- — амплитуда волны разрежения, Па;

ΔP_{r+} — амплитуда отраженной волны давления, Па;

ΔP_{r-} — амплитуда отраженной волны разрежения, Па;

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 людьми ориентации в пространстве и (или) координации движений (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 по безопасности

Термины и определения

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

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.

Детонация — распространение взрыва ТВС, обусловленное прохождением ударной волны со сверхзвуковой скоростью, обеспечивающей быструю химическую реакцию.

Дефлаграция — процесс дозвукового горения ТВС, при котором образуется быстро перемещающаяся зона (фронт) химических превращений. Передача энергии от зоны реакции в направлении движения фронта пламени происходит за счет теплопередачи и диффузии.

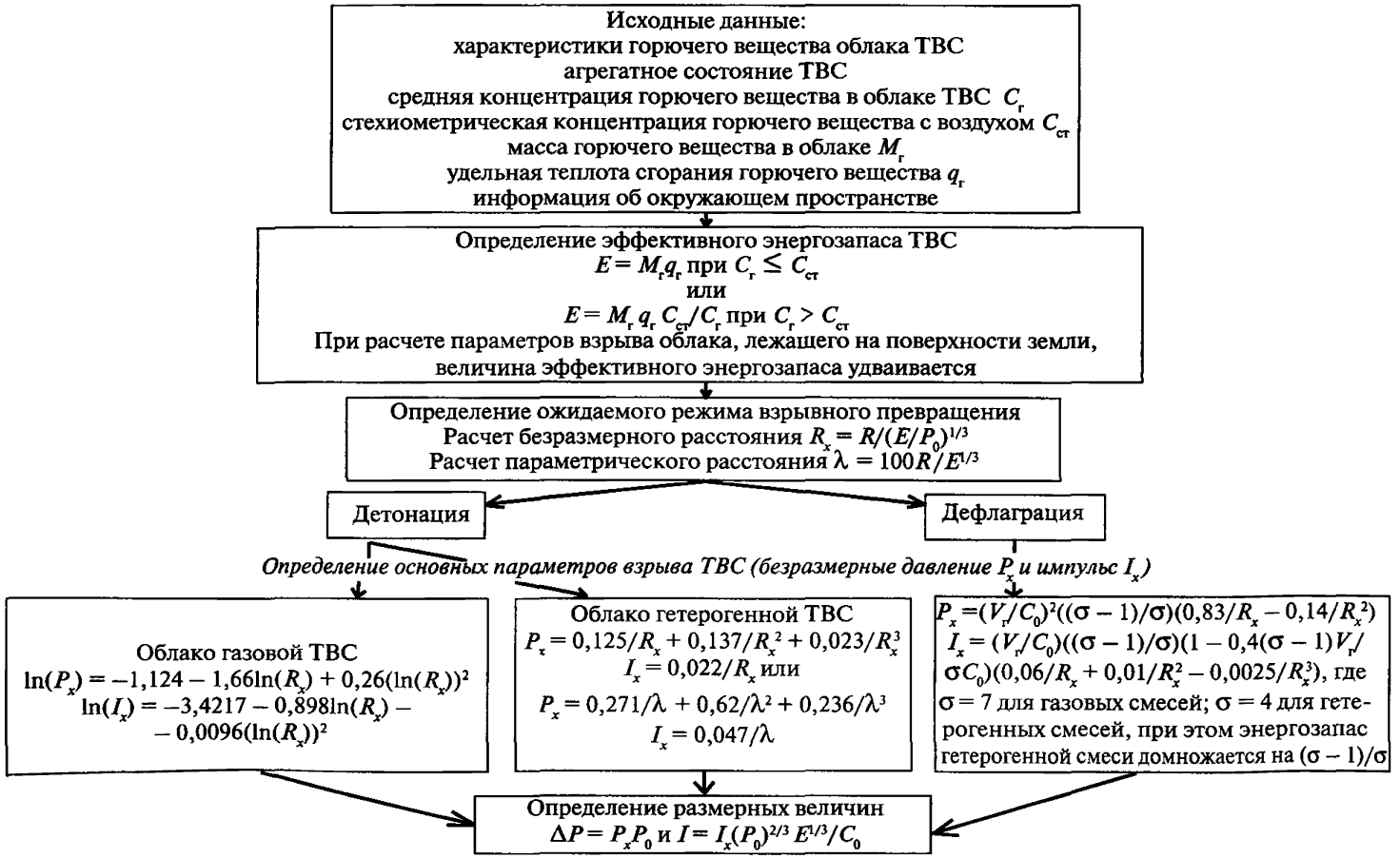
Ударная волна — распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью в газе, жидкости или твердом теле тонкая переходная область (фронт), в которой происходит резкое увеличение давления, плотности и скорости.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

Приложение № 3

к Руководству по безопасности

Рисунки и таблицы



© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

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

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

Декремент затухания $K_t = 0{,}889 - 0{,}356\ln\lambda + 0{,}105(\ln\lambda)^2$

↓

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

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 ТВС

Таблица № 1

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Класс 1		Класс 2		Класс 3		Класс 4	
Особо чувствительные вещества		Чувствительные вещества		Среднечувствительные вещества		Слабочувствительные вещества	
(Размер детонационной ячейки менее 2 см)		(Размер детонационной ячейки от 2 до 10 см)		(Размер детонационной ячейки от 10 до 40 см)		(Размер детонационной ячейки больше 40 см)	
	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
		Широкая фракция легких углеводородов	1	Метилпропилкетон	0,76	Нафталин	0,91
		Диметиловый эфир	0,66	Метилэтилкетон	0,71	Окись углерода	0,23
		Дивиниловый эфир	0,77	Октан	1	Фенол	0,92

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)	
	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, 2016

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

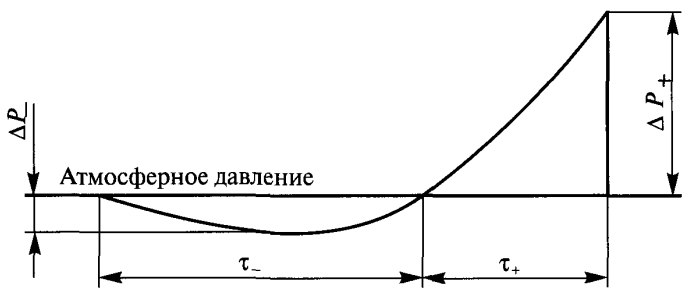


Рис. 2. Характерный профиль ударной волны при взрыве ТВС

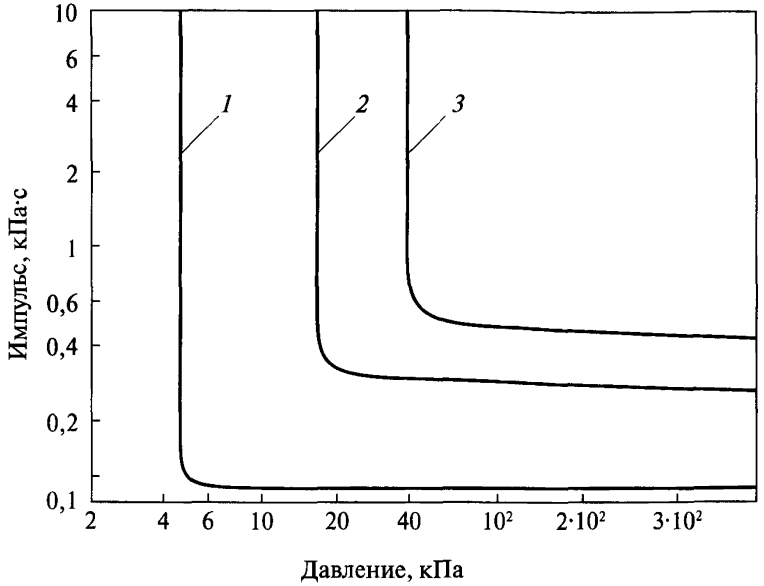


Рис. 3. P-I-диаграмма для оценки уровня разрушения промышленных зданий:
1 — граница минимальных разрушений; *2* — граница значительных повреждений; *3* — разрушение зданий (50–75 % стен разрушено)

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

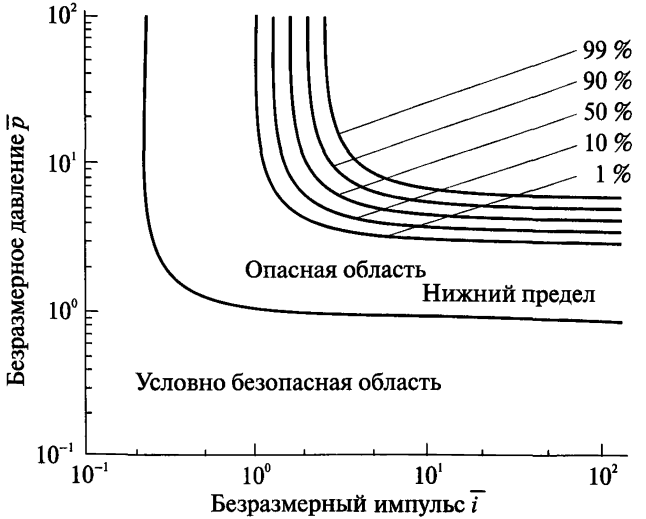


Рис. 4. P-I-диаграмма для экспресс-оценки поражения людей от взрыва ТВС

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

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-процентное разрушение остекления	0	2500	0
10-процентное и более разрушение остекления	0	2000	0
Поражение органов дыхания незащищенных людей			
50-процентное выживание	440	243 000	$1{,}44 \cdot 10^8$
Порог выживания (при меньших значениях смертельные поражения людей маловероятны)	100	65 900	$1{,}62 \cdot 10^7$

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

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

Приложение № 4
к Руководству по безопасности

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;

температура окружающей среды $T = 288$ К;

концентрация горючего в смеси $c_г = 0{,}14$ кг/м^3;

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

масса горючего вещества в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, $M_г = 8000$ 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 в таблице № 1 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности определяем, что пропан относится к классу 2 опасности (чувствительные вещества). Геометрические характеристики окружающего пространства согласно условию задачи и пункта 14 настоящего Руководства по безопасности относятся к виду 4 (открытое пространство). По экспертной таблице режима взрывного превращения № 2 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности определяем ожидаемый режим взрывного превращения облака ТВС — дефлаграция с диапазоном видимой скорости фронта пламени от 150 до 200 м/с. Для проверки режима 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):

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

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

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

Согласно соотношению (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 соотношениям (13) и (14) 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:

$$\Delta P = 2{,}9 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

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

Используя полученные значения ΔP и I, находим

$$\text{Pr}_1 = 6{,}11;\ \text{Pr}_2 = 4{,}48;\ \text{Pr}_3 = -3{,}11;\ \text{Pr}_4 = 3{,}06;\ \text{Pr}_5 = -2{,}48$$

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

Согласно связи вероятности поражения с пробит-функцией в таблице № 3 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности находим, что вероятность повреждений производственных зданий равна 87 %, вероятность разрушений производственных зданий составляет 30 %, а также вероятность разрыва барабанных перепонок у людей равна 2,5 %. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

На рисунке 1 приложения № 4 к настоящему Руководству по безопасности приведены зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС.



Рис. 1. Зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС

Пример 2

В результате внезапного раскрытия обратного клапана в пространство, загроможденное подводящими трубопроводами, выброшен газообразный этилен, во взрывоопасных пределах оказалось 100 кг этилена. Рядом с загазованным объектом на расстоянии 150 м находится помещение цеха. Концентрация этилена в облаке равна 80 г/м^3. Требуется определить степень поражения здания цеха и находящегося 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;

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

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

удельная теплота сгорания горючего газа $q_г = 4{,}6 \cdot 10^7$ Дж/кг;

окружающее пространство — загроможденное.

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

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

Исходя из классификации веществ в таблице № 1 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности определяем, что этилен относится ко 2 классу опасности (чувствительные вещества). Геометрические характеристики окружающего пространства согласно условию задачи и пункта 14 настоящего руководства относятся к виду 1 (загроможденное пространство). По таблице № 1 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности определяем диапазон ожидаемого режима взрывного превращения облака ТВС — первый, что соответствует детонации.

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

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

По соотношениям для падающей волны (15) — (20) 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 наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением

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

С учетом использования полученных значений ΔP_+ и I_+ по формулам раздела V настоящего Руководства по безопасности 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).

Согласно таблице № 2 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности вероятность разрушений производственных зданий равна 1 %. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

По соотношениям для отраженной волны (23) — (28) находим:

амплитуда отраженной волны давления

$$\Delta P_{r+}/P_0 = 0{,}14 \text{ или } \Delta P_{r+} = 1{,}4\cdot 10^4 \text{ Па при } P_0 = 101\ 325 \text{ Па};$$

амплитуда отраженной волны разрежения

$$\Delta P_{r-}/P_0 = 0{,}174 \text{ или } \Delta P_{r-} = 1{,}74\cdot 10^4 \text{ Па при } P_0 = 101\ 325 \text{ Па};$$

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

$$I_{r+} = 304{,}4 \text{ Па·с};$$

$$I_{r-} = 281{,}4 \text{ Па·с}.$$

© Оформление ЗАО НТЦ ПБ, 2016

Форма отраженной волны при взаимодействии со стенкой

$$\Delta P_r(t) = 1{,}4\cdot 10^4(\sin(\pi(t - 0{,}0534)/0{,}1906)/\sin(-\pi/0{,}0534/0{,}1906))\times \times\exp(-0{,}895t/0{,}0534).$$

С учетом использования полученных значений ΔP_+ и I_+ по формулам раздела V настоящего Руководства по безопасности имеем

$$Pr_1 = 4{,}49;\ Pr_2 = 3{,}28;\ Pr_3 = -7{,}95;\ Pr_4 = 1{,}95;\ Pr_5 = -8{,}96.$$

Согласно таблице № 2 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности вероятность повреждений производственных зданий равна 30 % и вероятность разрушений производственных зданий равна 4 %. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

На рисунке 2 приложения № 4 к настоящему Руководству по безопасности приведены зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС.

Пример 3

В резервуаре емкостью 2000 м^3 находится пропан в виде газа при температуре окружающей среды 24,5 °С и давлении 2 атмосферы. Резервуар расположен на товарно-сырьевой базе в равнинной местности (шероховатость поверхности — 0,0075 м). Происходит разгерметизация емкости, диаметр отверстия — 100 мм.

Метеоусловия: скорость ветра 3,2 м/с, класс устойчивости атмосферы — Е. Требуется определить зоны поражения ударной волной при взрыве облака ТВС в условиях слабо загроможденного пространства.

Решение

Сформируем исходные данные для дальнейших расчетов:
горючий газ — пропан;
агрегатное состояние смеси — газовое;
удельная теплота сгорания горючего газа $q_г = 4{,}64\cdot 10^7$ Дж/кг;
окружающее пространство — слабо загроможденное;
стехиометрическая концентрация пропана с воздухом $c_{ст} = 0{,}077$ кг/м^3.



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. 2. Зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС

Поскольку выброс продолжается длительное время, то в атмосфере может сформироваться протяженное облако ТВС. Согласно расчетам, приведенным в Руководстве по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утвержденном приказом Ростехнадзора от 20 апреля 2015 г. № 158, масса пропана $M_г$ во взрывоопасных пределах (НКПР — ВКПР) составляет 99 кг. Концентрация пропана в облаке принимается равной стехиометрической концентрации $c_{ст}$, что соответствует получению консервативных результатов расчета параметров взрыва облака ТВС.

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

Точка отсчета радиусов разрушения определена в центре масс облака ТВС в соответствии с Руководством по безопасности «Методы обоснования взрывоустойчивости зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах», утвержденным приказом Ростехнадзора от 13 мая 2015 г. № 189.

Результаты расчета рассеяния выброса пропана и взрыва облака ТВС представлены на рисунках 3 и 4 приложения № 4 к настоящему Руководству по безопасности.

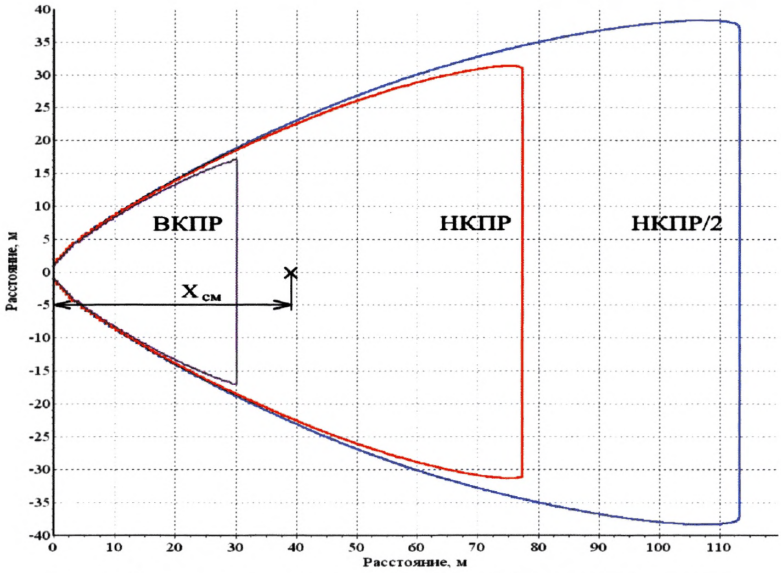


Рис. 3. Сечение зоны, ограниченной НКПР, 0,5 НКПР и ВКПР плоскостью $z = 0$ (в направлении по ветру) при выбросе пропана; x — место воспламенения облака ТВС; $X_{см}$ — расстояние между источником выброса опасного вещества (пропана) и точкой отсчета радиусов разрушения



Рис. 4. Зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС:
× — место выброса; × — место воспламенения облака

№ п/п	Наименование изолинии	Радиус поражения *r*, м	Цвет изолинии
1	Взрыв ТВС: пропан $M_г$ = 99 кг. Поражение избыточным давлением 5 кПа	197	
2	Взрыв ТВС: пропан $M_г$ = 99 кг. Поражение избыточным давлением 14 кПа	69	
3	Взрыв ТВС: пропан $M_г$ = 99 кг. Поражение избыточным давлением 28 кПа	29	

© Оформление. ЗАО НТЦ ПБ, 2016

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

Подписано в печать 06.10.2016. Формат 60×84 1/16.
Гарнитура Times. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Объем 2,75 печ. л.
Заказ № 826.
Тираж 20 экз.

Подготовка оригинал-макета и печать
Закрытое акционерное общество
«Научно-технический центр исследований
проблем промышленной безопасности»
)5082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14

gost.e-ecolog.ru