

**Вычисления параметров воздушных волны сжатия на заданном расстоянии R (100 м) от центра облака ТВС
(частный отчет)**

Исходные данные:

Наименование объекта:

Наименование вещества: пропан_пример_приказ_137 ГГ СЗН8

Молярная масса, кг/кМоль 44,097

Масса ТВС участвующего в горение, кг 8000,00

Коэффициент участия 1

Концентрация паров:

Сг 140 г/куб.м

Сст 77 г/куб.м

Удельная теплота сгорания топлива, МДж/кг 46,400

Класс опасности вещества: 2

Вид смеси: Агрегатное состояние: газовое

Распыл: гомогенный (газовый)

Положение облака в пространстве: облако лежит на земле

Вид окружающего пространства: 4. Слабо загроможденное и свободное пространство

Средняя масса человека, кг 80

Результаты расчета:

Эффективный энергозапас горючей смеси, МДж 408320,00

Скорость фронта пламени, м/с 200,00

Троилловый эквивалент облака ТВС, кг 36661,73

Размер горизонтальной зоны, ограничивающей область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени, м 178,559

Вывод. В результате расчёта установлено агрегатное состояние ТВС при температуре 15 °С: газовое.

Так как "Вид окружающего пространства" = 4 и "Класс горючего вещества" =2, то "Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения" будет =4 (Приложение 3, таблица 2). Режим взрывного превращения - Дефлаграция, скорость фронта пламени 150-200 м/с (уточнена пользователем $V_{\Gamma}=200$ м/с).

Для режима горения дефлаграционный газовый, $\Sigma=7$;

(Ф-10) и (Ф-11): P_{x1} и I_{x1} ; по (Ф-6) и (Ф-7): P_{x2} и I_{x2} ;

Сравнение по (Ф-12) $P_x=\min(P_{x1}, P_{x2})$, $I_x=\min(I_{x1}, I_{x2})$.

Руководство по безопасности "Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей" (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 марта 2016 г. № 137)

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

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_r ;
- стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом $C_{ст}$;
- масса горючего вещества в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, M_r ;
- удельная теплота сгорания горючего вещества q_r ;
- 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:

$$E = M_{\Gamma} q_{\Gamma} \quad \text{при} \quad C_{\Gamma} \leq C_{см} \quad (1)$$

или

$$E = M_{\Gamma} q_{\Gamma} C_{см} / C_{\Gamma} \quad \text{при} \quad C_{\Gamma} > C_{см}.$$

так как $140,000(C_{\Gamma}) > 77,000(C_{ст})$, то $E = 8000,000 \cdot 4,6400E+7 \cdot 77,000 / 140,000 = 2,0416E+11$

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

$$V = M_{\Gamma} / C_{см} \quad (2)$$

$$V = 8000,000 / 77,000 = 103,896$$

Облако лежит на земле, следовательно $E = 2 \cdot 2,0416E+11 = 4,0832E+11$

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, то 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_{Γ} в соотношении (1) принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа.

Теплота сгорания горючего газа q_{Γ} в ТВС берется из справочных данных или оценивается по формуле

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

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 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.

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 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:

$$V_{\Gamma} = k_1 M_{\Gamma}^{1/6}, \quad (3)$$

где k_1 – константа, равная 43.

Диапазон 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_{\Gamma} = k_2 M_{\Gamma}^{1/6}, \quad (4)$$

где k_2 – константа, равная 26.

Вывод. В результате расчёта установлено агрегатное состояние ТВС при температуре 15 °С: газовое.

Так как "Вид окружающего пространства" = 4 и "Класс горючего вещества" = 2, то "Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения" будет = 4 (Приложение 3, таблица 2). Режим взрывного превращения - Дефлаграция, скорость фронта пламени 150-200 м/с (уточнена пользователем $V_{\Gamma}=200$ м/с).

Для режима горения дефлаграционный газовый, $\Sigma=7$;

(Ф-10) и (Ф-11): P_{x1} и I_{x1} ; по (Ф-6) и (Ф-7): P_{x2} и I_{x2} ;

Сравнение по (Ф-12) $P_x=\min(P_{x1}, P_{x2})$, $I_x=\min(I_{x1}, I_{x2})$.

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 (100 м) от центра облака при детонации облака ТВС предварительно рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние по соотношению:

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

$$R_x = 100 / (4,0832E+11 / 1,0130E+5)^{1/3} = 0,628$$

При этом все соотношения также могут быть записаны в функциях аргумента $\lambda_{\text{пар}} = 100 \cdot r / E^{1/3} = 100 \cdot 100 / (4,0832E+11)^{1/3} = 1,348$. При принятых в Методике допущениях между R_x и λ существует простая связь: $\lambda_{\text{пар}} = 2,15 R_x$.

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:

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

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

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

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

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

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

Зависимости (8) и (9) справедливы для значений R_x больших величины $R_k = 0,25$. В случае если $R_x < R_k$, 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_f 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. Безразмерное давление P_{x1} и импульс фазы сжатия I_{x1} определяются по соотношениям:

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

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

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:

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

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) = \min(0,282, 0,743) = 0,282$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}) = \min(4,43E-02, 4,95E-02) = 4,43E-02$$

Итоговая таблица безразмерных величин P_x и I_x на выбранном удалении $R=100$ м от эпицентра облака ТВС и $R_x=0,628$

P_{x1}	I_{x1}	P_{x2}	I_{x2}	P_x	I_x
0,282 (Ф-10)	4,43E-02 (Ф-11)	0,743 (Ф 6-7)	4,95E-02 (Ф 6-7)	0,282 (Ф-12)	4,43E-02 (Ф-12)

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

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

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

$$\Delta P = 0,282 \cdot 101300 = 2,8527E+4 \text{ Па}$$

$$I = 4,43E-02 (101300)^{2/3} (4,0832E+11)^{1/3} / 343 = 2081,303 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

IV. Рекомендация по определению дополнительных характеристик 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 рассчитываются по следующим соотношениям (при $1,3 \leq \lambda_{\text{нар}} \leq 14$), где ΔP - Па, I - Па·с, τ - с:

Амплитуда фазы сжатия

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

$$\Delta P_+ = 7,5627 \text{E}+4$$

Амплитуда фазы разрежения

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

$$\Delta P_- = 1,5589 \text{E}+4$$

Длительность фазы сжатия

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

$$\tau_+ = 0,094$$

Длительность фазы разрежения

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

$$\tau_- = 0,305$$

Импульс фазы сжатия

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

$$I_+ = 2409,582$$

Импульс фазы разрежения

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

$$I_- = 2158,846$$

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

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

Для $t=10\text{с}$ и $\lambda_{\text{нар}} = 1,348$, $\Delta P(t, \lambda_{\text{нар}}) = -2,44 \text{E}-32$

30. Декремент затухания в падающей волне рассчитывается по соотношению

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

$$K_i = 0,792$$

Параметры отраженной волны

31. Для расчета параметров отраженной волны при ее нормальном падении на преграду используются следующие соотношения, где ΔP - Па, I - Па·с, τ - с:

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

$$\Delta P_{r+} = 1,9776 \text{E}+5$$

Амплитуда отраженной волны разрежения

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

$$\Delta P_{r-} = 3,8712 \text{E}+4$$

Длительность отраженной волны давления

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

$$\tau_{r+} = 0,087$$

Длительность отраженной волны разрежения

$$\ln(10^5 \tau_{r-} / E^{1/3}) = 1,265 + 0,875 \ln \lambda_{nap} - 0,192 (\ln \lambda_{nap})^2 \quad (26)$$

$$\tau_{r-} = 0,336$$

Импульс отраженной волны давления

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

$$I_{r+} = 5101,873$$

Импульс отраженной волны разрежения

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

$$I_{r-} = 5989,513$$

Общее время действия отраженных волн на мишень

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

$$\tau_{r+} + \tau_{r-} = 0,419$$

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

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

Для $t=10$ с и $\lambda = 1,348$, $\Delta P_r(t, \lambda) = 0,80 \text{E}-36$

33. Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению:

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

$$K_r = 0,836$$

Соотношения (15) – (31) справедливы при значениях λ_{nap} 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 $\lambda_{нар} \geq 1$ 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.

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 Р-І 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-процентная 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:

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

$$V_1 = (17500 / 2,8527E+4)^{8,4} + (290 / 2081,303)^{9,3} = 1,65E-02$$

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \ln (1,65E-02) = 6,067$$

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

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

$$V_2 = (40000/2,8527E+4)^{7,4} + (460/2081,303)^{11,3} = 12,199$$

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln(12,199) = 4,450$$

На рисунке 4 приложения № 3 к настоящему Руководству по безопасности приведена Р-І 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), попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС, может быть оценена по величине пробит-функции:

$$Pr_3 = 5 - 5,74 \ln V_3 \quad (36)$$

$$Pr_3 = 5 - 5,74 \ln(4,134) = -3,146$$

Фактор опасности V_3 рассчитывается по соотношению

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

$$V_3 = 4,2 / 1,282 + 1,3 / 1,518 = 4,134$$

Безразмерное давление и безразмерный импульс задаются выражениями:

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

$$\bar{p} = 1 + 2,8527E+4 / 1,0130E+5 = 1,282 \quad \text{и} \quad \bar{i} =$$

$$2081,303 / ((1,0130E+5)^{1/2} (80,000)^{1/3}) = 1,518$$

где m – масса тела живого организма, кг.

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

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

$$Pr_4 = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P \quad (39)$$

$$Pr_4 = -12,6 + 1,524 \ln(2,8527E+4) = 3,034$$

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

$$Pr_5 = 5 - 2,44 \ln V_5 \quad (40)$$

$$Pr_5 = 5 - 2,44 \ln(22,154) = -2,559$$

Здесь фактор V_5 рассчитывается из соотношения

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

$$V_5 = 7380 / 2,8527E+4 + 1300000000 / (2,8527E+4 \cdot 2081,303) = 22,154$$

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 вероятности повреждений промышленных зданий и поражения людей от взрыва облака ТВС на удалении $R=100$ м

Повреждения промышленных зданий от				
Оценка фактора		максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия (Ф-13, 14)	падающей волны при детонации облака газовой смеси при $1,3 \leq \lambda_{\text{пар}} \leq 14$ Ф-15...22)	отраженной волны при ее нормальном падении на преград (при $\lambda_{\text{пар}}$ до 51,6 Ф-23...31)
параметр	значение			
1	2	3	4	5
Вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса (Ф-32) Pr_1	Pr_1	6,067	8,196	10,295
	P	85	100,000	100,000
Вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса (Ф-32)	Pr_2	4,450	6,037	7,602
	P	28	84,000	99,500
1	2	3	4	5
Поражения людей от				
Вероятность длительной потери людьми ориентации в пространстве и (или) координации движений (состояние нокдауна) (Ф-36)	Pr_3	-3,146	-1,576	1,716
	P	0	0	0
Вероятность разрыва барабанных перепонок (Ф-39)	Pr_4	3,034	4,520	5,985
	P	2	31,000	83,000
Вероятность отброса людей волной давления (Ф-40)	Pr_5	-2,559	0,173	4,312
	P	0	0	24,000

Оценка радиусов зон поражения

42. Для определения зон поражения может быть 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.

Результаты оценки приведены в табличной форме Общего отчета, «Характеристика зон поражения при барическом воздействии по вероятностным критериям (оценка с использованием пробит-функций) анализа графика экспресс-оценки».

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:

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

$$W = 0,4 / 0,9 (8000,000 \cdot 4,6400E+7) / 4,5 \cdot 10^6 = 3,6662E+4$$

где q_{Γ} – теплота сгорания газа.

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

$$r = KW^{1/3} / (1 + (3180 / W)^2)^{1/6} \quad (45)$$

$$r = 3,8 (3,6662E+4)^{1/3} / (1 + (31800 / 3,6662E+4)^2)^{1/6} = 126,080$$

Приложение № 1
к Руководству по безопасности
"Методика оценки последствий аварийных
взрывов топливно-воздушных смесей"
от 31 марта 2016 г. № 137

Список сокращений

В настоящем Руководстве используются следующие обозначения и сокращения:

ВКПР - верхний концентрационный предел распространения пламени;
НКПР - нижний концентрационный предел распространения пламени;
ТВС - топливно-воздушная смесь;
 C_0 - скорость звука в воздухе, м/с;
 C_r - концентрация горючего вещества в облаке ТВС, кг/м³;
 $C_{ст}$ - стехиометрическая концентрация вещества в смеси с воздухом, кг/м³;
Е - 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;
К - коэффициент уравнения;
k - коэффициент уравнения;
 K_i - декремент затухания;
 K_r - декремент изменения давления в отраженной волне;
 M_r - масса горючего вещества в облаке ТВС, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, 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;
 P_0 - атмосферное давление, Па;
 P_x - безразмерное давление;
 P_{r1} - пробит-функция повреждений стен промышленных зданий;
 P_{r2} - пробит-функция разрушения промышленных зданий;
 P_{r3} - пробит-функция длительной потери людьми ориентации в пространстве и (или) координации движений (состояние нокдауна);
 P_{r4} - пробит-функция разрыва барабанных перепонки у людей;
 P_{r5} - 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_f - скорость видимого фронта пламени, м/с;

W - тротильный эквивалент взрыва ТВС, кг;

m - средняя масса человека, кг;

q_f - 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;

$\tau_{г+}$ - длительность отраженной волны давления, с;

$\tau_{г-}$ - длительность отраженной волны разрежения, с

Приложение № 2
к Руководству по безопасности
"Методика оценки последствий аварийных
взрывов топливно-воздушных смесей"
от 31 марта 2016 г. № 137

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 давления или возникновению ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов, способных привести к разрушительным последствиям;

Приложение № 3
к Руководству по безопасности
"Методика оценки последствий аварийных
взрывов топливно-воздушных смесей"
от 31 марта 2016 г. № 137

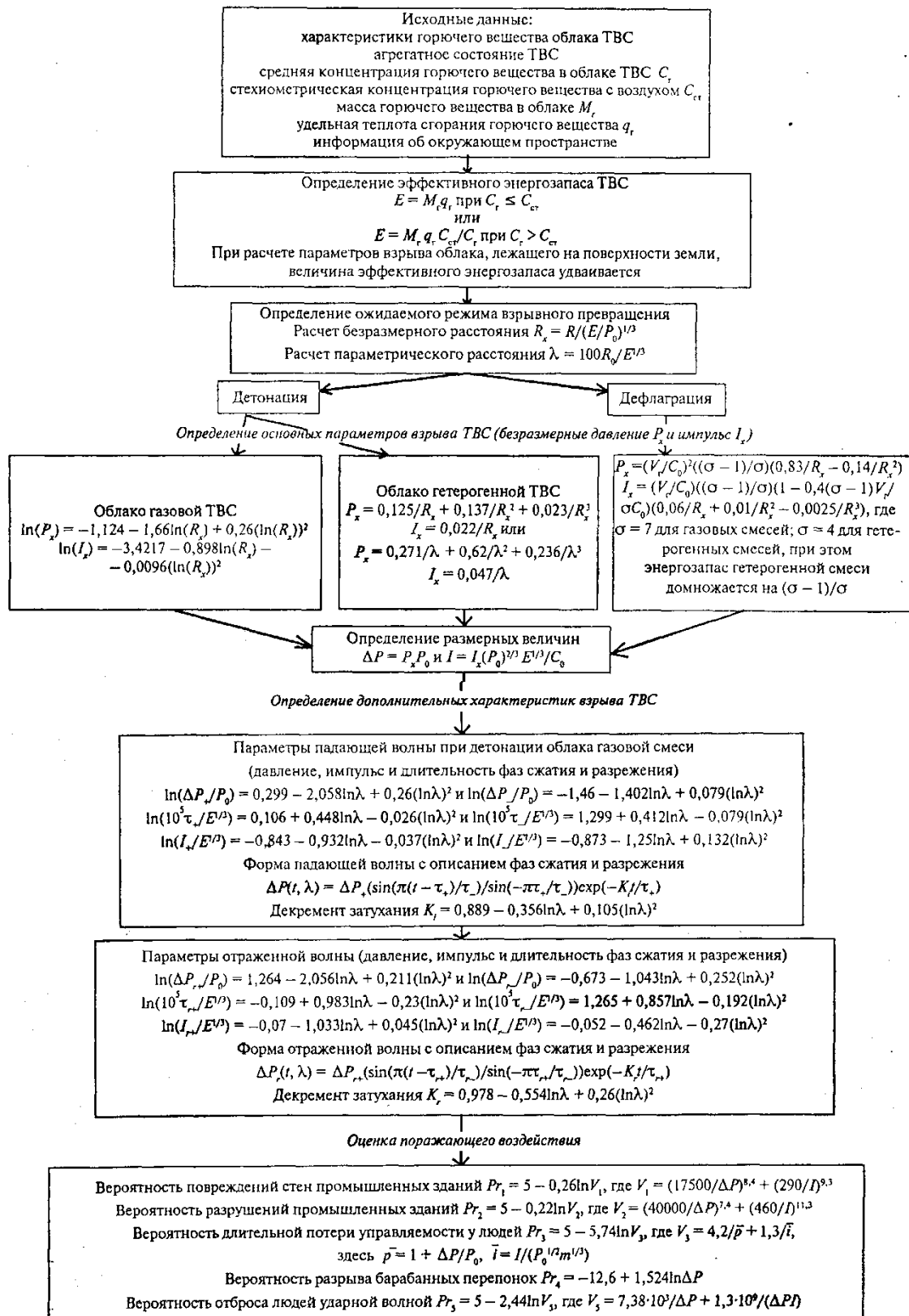


Рис. 1. Алгоритм расчета последствий аварийных взрывов ТВС

Таблица 1

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Класс 1		Класс 2		Класс 3		Класс 4	
Особо чувствительные вещества		Чувствительные вещества		Средне-чувствительные вещества		Слабо-чувствительные вещества	
(Размер детонационной ячейки менее 2 см)		(Размер детонационной ячейки от 2 до 10 см)		(Размер детонационной ячейки от 10 до 40 см)		(Размер детонационной ячейки больше 40 см)	
1	2	3	4	5	6	7	8
	β		β		β		β
Ацетилен	1,1	Акрилонитрил	0,67	Ацетальдегид	0,56	Аммиак	0,42
Винилацетилен	1,03	Акролеин	0,62	Ацетон	0,65	Бензол	0,88
Водород	2,73	Бутан	1,04	Бензин	1	Декан	1
Гидразин	0,44	Бутилен	1	Винилетат	0,51	Дизтопливо	1
Изопропилнитрат	0,41	Бутадиен	1	Винилхлорид	0,42	0-дихлор-бензол	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	Метил-амин	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
		Демитиловый эфир	0,66	Метилэтилкетон	0,71	Окись углерода	0,23
		Дивиниловый эфир	0,77	Октан	1	Фенол	0,92
		Метилбутиловый эфир	-	Пиридин	0,77	Хлорбензол	0,52
		Диэтиловый эфир	0,77	Сероводород	0,34	Этилбензол	0,90
		Диизопропиловый эфир	0,82	Метиловый спирт	0,52	Дихлорэтан	0,25
				Этиловый спирт	0,62	Трихлорэтан	0,14
				Пропиловый спирт	0,69		
				Амиловый спирт	-		
				Изобутиловый спирт	0,79		
				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		

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

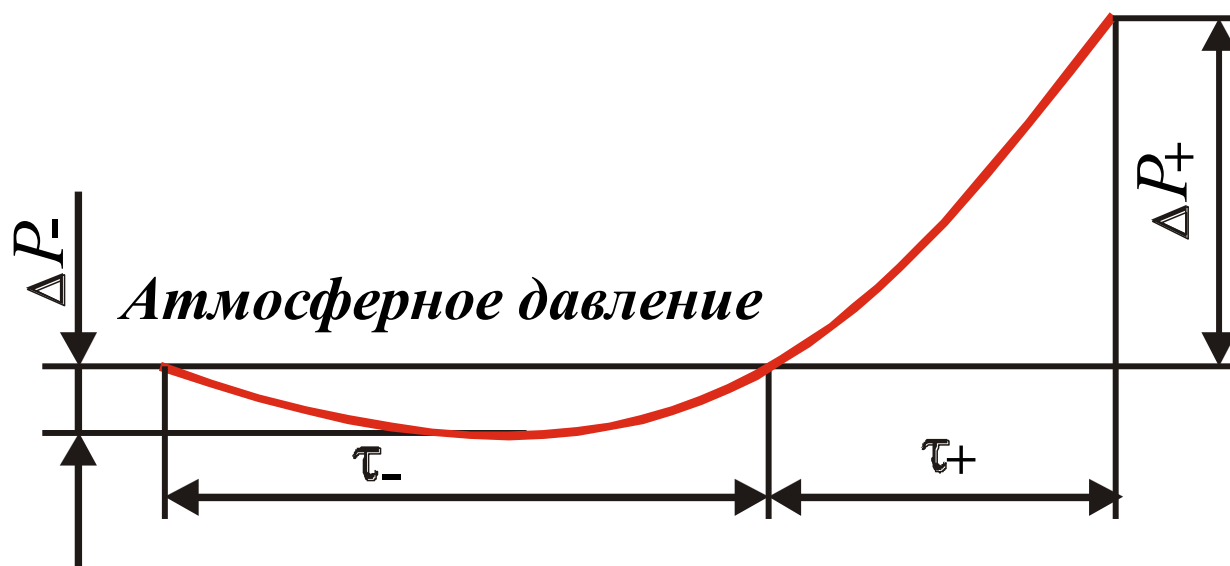


Рис. 2. Характерный профиль ударной волны

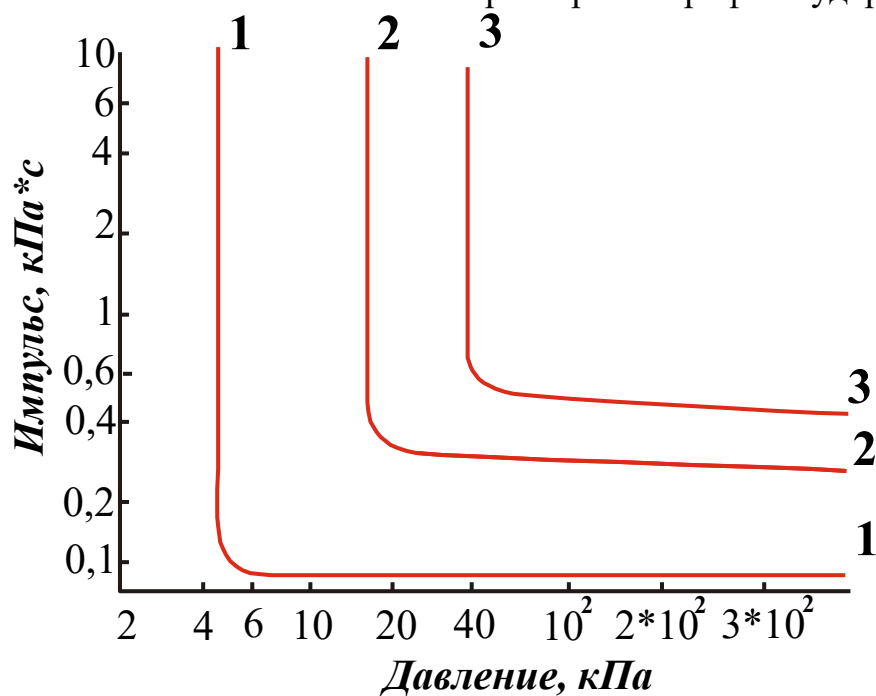


Рис. 3. $P - I$ диаграмма для оценки уровня разрушения промышленных зданий:
 1- граница минимальных разрушений; 2 – граница значительных повреждений; 3 –
 разрушение зданий (50 – 75% стен разрушено)

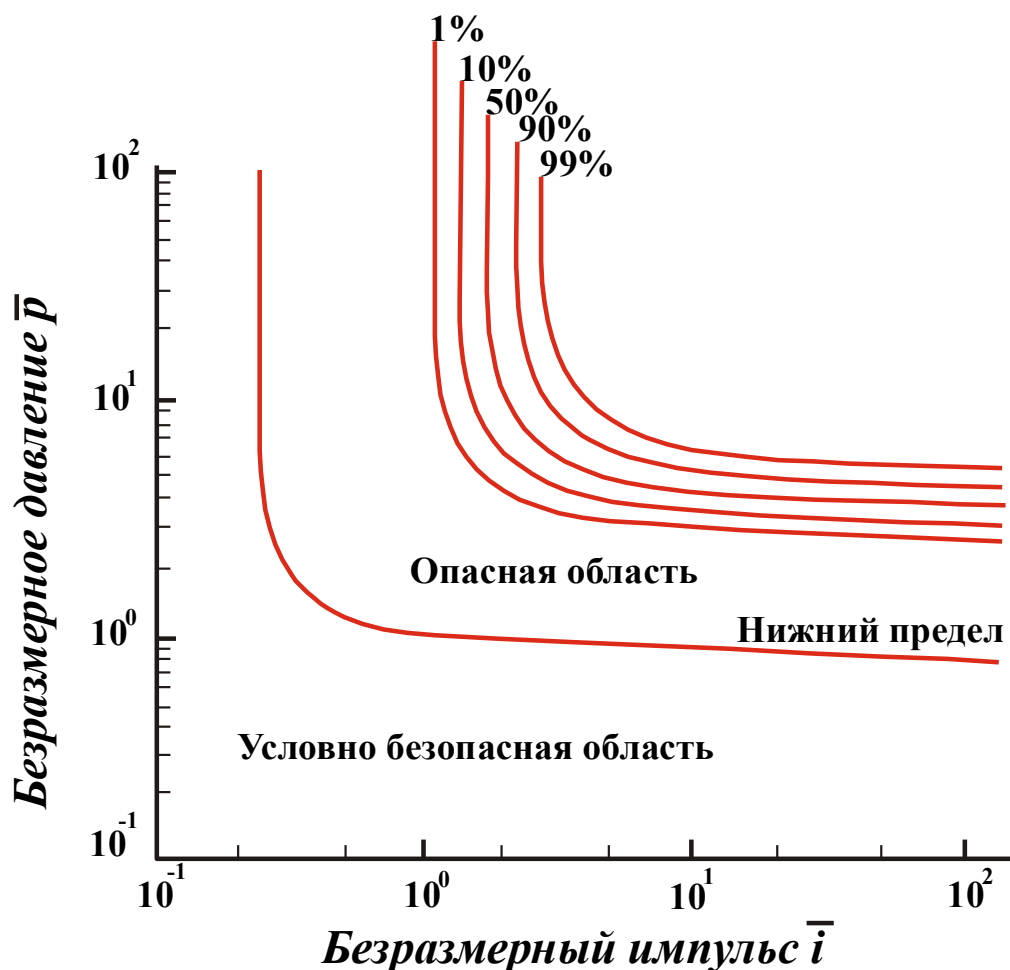


Рис. 4. $P - I$ диаграмма для экспресс-оценки поражения людей от взрыва ТВС

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			
Полных разрушений зданий	770	70100	886100
Граница области сильных разрушений: 50-75% стен разрушено или находится на грани	520	34500	541000

разрушения			
Граница области значительных повреждений: повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку	300	14600	119200
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 разрушения остекления	0	2000	0
Поражение органов дыхания незащищенных людей			
50% выживание	440	243000	$1,44 \cdot 10^8$
Порог выживания (при меньших значениях смерт. поражения людей маловероятны)	100	65900	$1,62 \cdot 10^7$

Таблица № 5

Уровни разрушения зданий

Категория повреждения	Характеристика повреждения здания	Избыточное давление ΔP , кПа	Коэффициент К
А	Полное разрушение здания	≥ 100	3,8
В	Тяжелые повреждения, здание подлежит сносу	70	5,6
С	Средние повреждения, возможно восстановление здания	28	9,6
Д	Разрушение оконных проемов, легкобрасываемых конструкций	14	28,0
Е	Частичное разрушение остекления	$\leq 2,0$	56