

В. Ю. Восток (Москва, ЦСИ ГЗ МЧС России). **К вопросу выбора вида пробит-функции для определения вероятности поражения человека ударной волной.**

На практике при анализе риска вероятность поражения (гибели и/или причинения вреда здоровью) человека P в результате воздействия тех или иных поражающих факторов принято описывать нормальным законом распределения вероятности, аргументом которого служит так называемая пробит-функция Pr :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp \left\{ -\frac{u^2}{2} \right\} du. \quad (1)$$

Наиболее употребляемые в отечественной литературе пробит-функции для определения вероятности поражения человека ударной волной имеют вид:

$$Pr_2 = 5 - 2,44 \ln \left(\frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P_f} + \frac{a \cdot 10^9}{I_+ \Delta P_f} \right), \quad (2)$$

$$Pr_3 = 5 - 5,74 \ln \left(\frac{4,2}{1 + \Delta P_f / P_0} + \frac{1,3 P_0^{1/2} m^{1/3}}{I_+} \right), \quad (3)$$

где ΔP_f и I_+ — избыточное давление на фронте ударной волны и удельный импульс фазы сжатия, P_0 — атмосферное давление, m — масса человека. (Здесь и далее по тексту размерность всех параметров соответствует Международной системе единиц СИ.) Значение коэффициента a в соотношении (2) у разных авторов варьируется от 1,3 до 1,9 [2]–[4].

Для расчета величин избыточного давления и удельного импульса целесообразно использовать так называемые *формулы Садовского*, являющиеся «обязательными для всех министерств, ведомств, учреждений и организаций на территории СНГ» [1]:

$$\frac{P_s}{P_0} = \frac{0,95}{(R/q^{1/3})} + \frac{3,9}{(R/q^{1/3})^2} + \frac{13}{(R/q^{1/3})^3}, \quad I_+ = 540 \frac{q^{1/3}}{(R/q^{1/3})}. \quad (4)$$

Здесь R — расстояние от эпицентра взрыва, q — тротиловый эквивалент массы взрывчатых веществ.

Соотношения (2) и (3) в различных источниках рекомендуется использовать для определения вероятности разных последствий поражения человека ударной волной. Рекомендации по их использованию сведены в табл. 1.

Таблица 1. Использование соотношений (2), (3) для определения вероятности различных последствий поражения человека ударной волной

Источники	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
Последствия поражения человека					
«Метательное» поражение (наиболее легкая форма поражения человека)	(2)				
Травмы средней и тяжелой степени	(3)	(3)			
Летальный исход		(2)	(2)	(3)	(3)

Такая неоднозначность — вполне нормальное явление в период накопления данных при невозможности обеспечить идентичные условия для проведения повторного «эксперимента». Однако, на наш взгляд, несложный количественный анализ позволяет несколько понизить ее уровень.

Во-первых, для взрывной волны в качестве аксиомы может быть принято следующее положение: при любом взрыве можно выделить область вокруг эпицентра, за пределами которой вероятность более легкой формы поражения больше вероятности

более тяжелой (или вероятность нелетального поражения становится больше вероятности гибели). Если сравнить $P(Pr_2)$ и $P(Pr_3)$, рассчитываемые по (1) с учетом соотношений (2)–(4), то можно увидеть, что для взрыва любой мощности на любом расстоянии от эпицентра $P(Pr_2) > P(Pr_3)$. Итак, использование указанных соотношений в [2] соответствует сформулированной выше аксиоме, а в [3] — противоречит.

Во-вторых, анализ большого массива данных по ядерным и крупным химическим взрывам [7] показал, что по мере увеличения времени действия (длительности) фазы сжатия ударной волны t_+ , которое, в соответствии с [1], определяется как $t_+ = 1,7 \cdot 10^{-3} q^{1/3} (R/q^{1/3})^{1/2}$, все вероятностные характеристики поражения человека асимптотически стремятся к функциям, зависящим только от значения избыточного давления на фронте ударной волны, которое, в свою очередь, в соответствии с (4), однозначно определяется значением параметра $R/q^{1/3}$. (При t_+ в несколько десятков миллисекунд различия с асимптотиками практически отсутствуют.) Из этого следует, что параметр $R_{50}/q^{1/3}$ (где R_{50} — расстояние от эпицентра, на котором P принимает значение, равное 0,5) по мере увеличения длительности фазы сжатия должен стремиться к постоянному значению.

Если посмотреть, как меняется указанный параметр с увеличением мощности заряда от 1 т до 1000 т (см. рис.), то можно сделать вывод о качественной непригодности соотношения (2) для оценки вероятности поражения человека ударной волной.

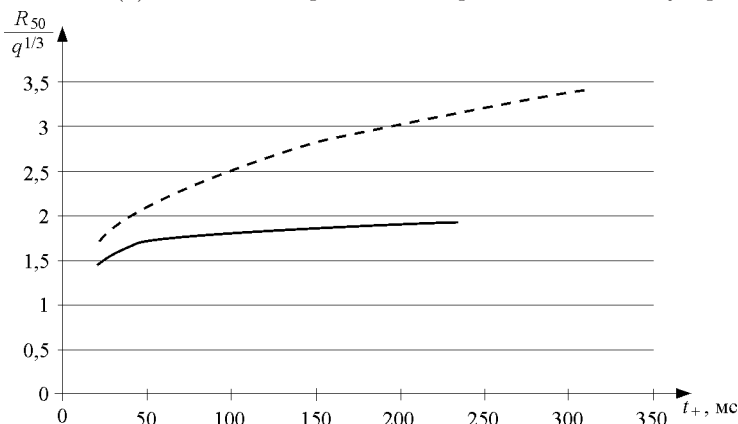


Рис. Зависимость параметра $R_{50}/q^{1/3}$ от длительности фазы сжатия ударной волны при различных видах пробит-функции пунктирная линия — соотношение (2), сплошная линия — соотношение (3)

Если говорить о соотношении (3), то сравнение расчетных значений $R_{50}(Pr_3)$ со значениями радиуса зоны летальных потерь при взрыве R^* , которые используются в таком авторитетном источнике, как [8] (табл. 2), позволяет считать целесообразным использование его для определения вероятности гибели людей при распространении ударной волной вследствие взрыва. (Предполагается, что все люди, оказавшиеся в зоне летальных потерь, должны погибнуть, при этом гибель людей за ее пределами считается невозможной.)

Таблица 2. Сравнение расчетных значений R_{50} с размерами зоны безвозвратных потерь при взрыве [8]

q , т	1	10	200	1000
$R_{50}(Pr_3)$	14,4	36,4	108	190
R^* [8]	25	50	100	200

Выбор круга радиусом R_{50} в качестве зоны летальных потерь, с математической точки зрения, представляется рациональным, по крайней мере, в случае применения

соотношения (3) для определения вероятности гибели людей. Расчеты показывают, что в широком диапазоне мощности взрыва (от 1 т до 1000 т) при постоянной плотности распределения людей с на площади, прилегающей к месту взрыва, число людей, находящихся внутри рассматриваемой зоны, относительно общего числа летальных потерь составляет

$$\frac{\pi \rho R_{50}^2}{2\pi \rho \int_0^\infty P(Pr_3) r dr} = 0,97 \div 0,98.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: НПО ОБТ, 1992.
2. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сборник документов. Сер. 27, в. 2. М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002.
3. *Мастрюков Б. С.* Безопасность в чрезвычайных ситуациях. М.: Издательский центр «Академия», 2003.
4. *Сафонов В. С., Одишария Г. Э., Швыряев А. А.* Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М.: РАО «Газпром», 1996.
5. *Белов П. Г.* Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. М.: Издательский центр «Академия», 2003.
6. *Елохин А. Н.* Анализ и управление риском: теория и практика. М.: Страховая группа «Лукойл», 2000.
7. База данных по ядерным и крупным химическим взрывам с выбросом в атмосферу: Свидетельство № 2863 от 12.12.1997. Зарегистрировано за № 0229703124 в Государственном регистре.
8. Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries. IAEA-TECDOC-727. Vienna: IAEA, 1993.