

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОВЕДЕНИЮ ПРОГНОЗНОЙ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ КОМБИНИРОВАННОГО ПОРАЖЕНИЯ ПРИ АВАРИЯХ НА ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

Клюжин А.В., Егорова Ю.А., Фомичёв С.В.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

В настоящее время к угрозе техногенных аварий и катастроф добавилась угроза террористических актов. Химически опасные объекты являются, по своей сути, источником угрозы: они могут многократно усилить действие любого взрывного устройства за счет образования в атмосфере газовой смеси (ГВС) в результате реализации аварии. [1, 2]

При прогнозировании последствий таких аварий следует учитывать то, что техногенная катастрофа на химически опасном производстве может приобретать различные масштабы и последствия. Но при террористическом акте всегда следует исходить из того, что взрыв будет иметь наиболее тяжкие последствия, как в отношении гибели людей, так и разрушения промышленного объекта и жилых зданий. [3, 4]

Между мощностью взрыва и избыточным давлением воздушной ударной волны (ВУВ) на различных радиусах существует зависимость (1), называемая законом подобия Хопкинсона [5]:

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt[3]{\frac{g_1}{g_2}}, (1)$$

где R_1 и R_2 - радиусы фронта ударной волны двух взрывов одинаковым значением избыточного давления, М;

g_1 и g_2 - мощность двух взрывов, кг.

Введем понятие среднего радиуса поражения R_{cp} . Очевидно, он является средним арифметическим для наблюдаемых значений радиуса поражения и является центром распределения всевозможных значений радиуса поражения. Для нашего случая, когда данные не сгруппированы, величина R_{cp} будет определяться (2) как сумма значений всех радиусов совокупности, деленная на их общее число n :

$$R_{cp} = \frac{R_{\Sigma}}{n}, (2)$$

где R_{cp} - средний радиус поражения, м;

R_{Σ} - сумма значений всех радиусов совокупности при изменении давления во фронте ВУВ от 3 ат до 0,1 ат, м;

n - количество определяемых радиусов зон поражения при изменении давления во фронте ВУВ от 3 ат до 0,1 ат. Т.е. по данным таблицы 1 для массы смеси равной 0,1 т величина R_{cp} составит 44 м.

Среднее значение радиусов зон избыточного давления ВУВ при увеличении

массы газовой смеси в 10 раз составит:

$$\frac{2 + 3,02 + 2,5 + 2 + 2,2}{5} \approx 2,12 \text{ раза} \quad (3)$$

Аналогичные результаты получаются при увеличении массы смеси с 1,0 т до 10 т, с 10,0 до 100 т т.д. Изучив данные таблицы 1, можно сделать следующие выводы:

1) увеличение количества смеси в 10 раз ведет к увеличению среднего радиуса поражения приблизительно в 2,12 раза, то есть выполняется закон подобия Хопкинсона;

2) средний радиус зон поражения является средним арифметическим для наблюдаемых значений радиуса зон поражения.

Путем аппроксимирования данных, представленных в таблице 1, были получены следующие зависимости:

1) значение радиуса R при давлении во фронте ВУВ 3 ат составит:

$$R_{3,0} = \frac{R_{cp}}{3} \quad (4)$$

2) значение радиуса R при давлении во фронте ВУВ 1 ат составит:

$$R_{1,0} = R_{cp} - R_{3,0} \quad (5)$$

3) значение радиуса R при давлении во фронте ВУВ 0,4 ат составит:

$$R_{0,4} = R_{cp} \quad (6)$$

4) значение радиуса R при давлении во фронте ВУВ 0,1 ат составит:

$$R_{0,1} = 2R_{cp} \quad (7)$$

Отметим закономерность, что величина R_{cp} равна величине радиуса зоны поражения с величиной избыточного давления ВУВ в этой зоне равной 0,4 ат, т.е. $R_{cp} = R_{0,4}$. Таким образом, произведя анализ полученного характера зависимостей, можно с определенной долей уверенности утверждать, что при взрыве одной тонны газовой смеси определенного вещества, определив радиус зоны, в которой давление ВУВ составит 0,4 атмосферы, можно рассчитать значения радиусов зон избыточного давления равного 3,0 ат, 1,0 ат, 0,4 ат, 0,1 ат для данного вещества в пределах 100 тонн. Поясним на примере: пересчитаем данные таблицы 1, используя значения радиуса зоны с давлением ВУВ, равным 0,4 ат.

Таблица 1 - Рассчитанные радиусы избыточного давления

Количество смеси, т	Радиусы зон избыточного давления, м		
	3,0 ат	1,0 ат	0,1 ат
0,1	14,7	29,3	88
1,0	35,3	70,7	212
10,0	66,7	133,3	400
100,0	144,7	289,3	868

Сравнив опытные и теоретические результаты, рассчитав процент относительных ошибок, мы видим, что используемая система подсчета с использованием R_{cp} дает достаточную точность вычисления радиусов зон поражения.

Так как при расчетах величина массы газовой смеси будет изменяться на несколько порядков, то нужно ввести степенной коэффициент пересчета n . В нашем случае он определяется величиной $2,12^n$ и, в зависимости от массы смеси (M), будет принимать следующие значения:

Если $M \leq 10$ кг, $top=1$;

$10 < M \leq 100$ кг, $top=2$;

$100 < M \leq 10000$ кг, $top=3$;

$10000 < M \leq 100000$ кг, $top=4$.

Для того, чтобы учесть мощность газовой смеси, используем уточняющий множитель $2 \cdot R_{(0,4)}$, где $R_{(0,4)}$ - радиус зоны поражения, давление в которой составит 0,4 ат при взрыве 1 кг данной газовой смеси. Так как масса смеси величина переменная, введем в формулу следующее слагаемое

$\left(1 + \frac{M}{10^n}\right)$. Формула для определения величины исходного радиуса $R_{исх}$,

необходимого для последующего вычисления радиусов зон поражения с соответствующими им степенями поражения, примет вид:

$$R_{исх} = 2,12^n \cdot 2 \cdot R_{0,4} + \left(1 + \frac{M}{10^{n-1}}\right) \quad (8)$$

Формула (8) служит основой для расчета радиусов зон поражения $R_A, R_B, R_C, R_{Д1}, R_{Д}$ (формулы 4-7) с соответствующими им степенями поражения А, В, С, Д1, Д:

А - смертельный исход от полученных травм (крайне тяжелая степень поражения);

$$R_A = (R_{исх}/3) \cdot 0,4 \quad (9)$$

В - значительная контузия всего организма, повреждение внутренних органов, головного мозга, переломы конечностей и позвоночника. Возможен летальный исход (тяжелая степень поражения);

$$R_B = \sqrt{2,12} \cdot R_A \quad (10)$$

С - серьезные контузии, повреждения органов слуха, кровотечения из носа и ушей, вывихи и переломы конечностей (средняя степень поражения);

$$R_C = 2 R_A \quad (11)$$

Д1 - легкая контузия всего организма, временное повреждение слуха, ушибы и вывихи конечностей, потеря дееспособности на время не менее 2 часов (легкая степень поражения);

$$R_{Д1} = R_A \cdot (1 + \sqrt{2,12}) \quad (12)$$

Д - характеризуется потерей дееспособности на время не менее 0,5 часа (пороговая степень поражения).

$$R_{Д} = 2 \sqrt{2,12} \cdot R_A \quad (13)$$

Второй по важности поражающий фактор объёмного взрыва – это высокотемпературный поток. Высокотемпературный поток может вызывать у людей ожоги открытых участков кожи, поражение глаз. Кроме того, ожоги возможны в результате действия горячего воздуха в ударной волне. Различают четыре степени ожогов и четыре степени тяжести термических поражений человека, определяющиеся глубиной термического поражения кожи и площадью ожога: I степень - покраснение кожи, отек, жгучая боль; II степень - образование пузырей, заполненных прозрачной жидкостью; III степень - некроз (омертвление) всех слоёв кожи; IV степень - некроз подкожных тканей.

Степень ожога определяется величиной теплового импульса, которая главным образом зависит от мощности взрыва. Значения теплового импульса, вызывающие ожоги кожи открытых участков тела человека, приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Световые импульсы, вызывающие ожоги кожи открытых участков тела человека

Степень ожога	Величина импульса, кал/см ²
I	2,4
II	3,5
III	4,9
IV	5,5

Персонал теряет работоспособность при ожогах 2 и 3 степени открытых участков кожи (лица, кистей рук). Световое излучение высокотемпературной области может вызвать ожоги век, переднего отдела глаза, глазного яблока, глазного дна и временное ослепление.

Кроме того, тепловой импульс может вызывать воспламенение легко воспламеняющихся объектов. Тепловую энергию, падающую на единицу поверхности, можно оценить по критериальному уравнению, полученному на основе теории размерности:

$$\frac{I_{т.э.}}{B \cdot G \cdot M^{1/3} \cdot \Theta^{2/3}} = \frac{(D/R)^2}{F + (D/R)^2} \quad (14)$$

где M - масса термобарической смеси, кг

Θ - температура огненного шара, °C

D - диаметр огненного шара.

Произведение $B \cdot G$ для объёмно детонирующей смеси (ТБС) равно 5; $\Theta = 161,7$.

Тогда импульс тепловой энергии будет равен

$$I_{т.э.} = 5,0 \cdot M^{1/3} \cdot \Theta^{2/3} \frac{(D/R)^2}{161,7 + (D/R)^2} \quad (15)$$

где $I_{т.э.}$ - величина тепловой энергии, кДж/м².

Анализ результатов исследований позволил установить, что среднестатистическая температура зоны пламени для объёмно-детонирующей смеси составляет 1623 °С, а диаметр зоны описывается уравнением вида:

$$D = 5,4 \cdot M^{0,34} \quad (16)$$

где M -масса смеси, кг

Подставляя в формулу (15) данные, полученные для радиусов поражения $R_A, R_B, R_C, R_D, R_{DI}$ мы можем получить величины тепловой энергии, выделившейся на каждом из этих радиусов.

Для вычисления радиусов тепловой энергии нужно преобразовать формулу(16):

$$R = \sqrt{\frac{(5,0 \cdot M^{1/3} \cdot \Theta^{2/3} - I_{T,Э}) \cdot D^2}{161 \cdot I_{T,Э}}} \quad (16)$$

где M – масса термобарической смеси, кг ;

Θ - температура огненного шара, °С ;

$I_{T,Э}$ -величина тепловой энергии, кДж/м² ;

D - диаметр огненного шара, м.

Для расчета радиусов поражения тепловой энергией четырех степеней тяжести используем данные по поражающему действию . В частности, используем значение импульсов тепловой энергии для четырех степеней поражения открытых участков кожи:

$$I_{T,Э} = 5,5 \text{ кал/см}^2 ; I_{T,Э} = 4,9 \text{ кал/см}^2$$

$$I_{T,Э} = 3,5 \text{ кал/см}^2 ; I_{T,Э} = 2,4 \text{ кал/см}^2$$

Радиусы тепловой энергии будут рассчитываться по формулам:

$$R_{IV} = \sqrt{\frac{(5,0 \cdot M^{1/3} \cdot \Theta^{2/3} - I_{T,Э,IV}) \cdot D^2}{161 \cdot I_{T,Э,IV}}} \quad (17)$$

$$R_{III} = \sqrt{\frac{(5,0 \cdot M^{1/3} \cdot \Theta^{2/3} - I_{T,Э,III}) \cdot D^2}{161 \cdot I_{T,Э,III}}} \quad (18)$$

$$R_{II} = \sqrt{\frac{(5,0 \cdot M^{1/3} \cdot \Theta^{2/3} - I_{T,Э,II}) \cdot D^2}{161 \cdot I_{T,Э,II}}} \quad (19)$$

$$R_I = \sqrt{\frac{(5,0 \cdot M^{1/3} \cdot \Theta^{2/3} - I_{T,Э,I}) \cdot D^2}{161 \cdot I_{T,Э,I}}} \quad (20)$$

Расчеты радиусов поражения воздушной ударной волной и тепловой энергией представлены в таблицах 3, 4.

Таблица3 -Радиусы поражения ВУВ для различной массы ГВС

Масса ГВС, кг	Радиусы поражения различных степеней тяжести					
	$R_{ср.}$	R_A	R_B	R_C	R_{DI}	R_D
1	12,65	1,69	2,46	3,37	4,14	4,91
2	13,28	1,84	2,68	3,68	4,52	5,36
3	14,95	1,99	2,9	3,99	4,9	5,8

4	16,10	2,15	3,13	4,29	5,28	6,26
5	17,25	2,3	3,36	4,6	5,66	6,67
6	18,4	2,45	3,58	4,9	6,03	7,11
7	19,55	2,61	3,81	5,22	6,42	7,57
8	20,7	2,76	4,03	5,52	6,79	8,0
9	21,85	2,91	4,25	5,82	7,16	8,44
10	23,0	3,07	4,78	6,14	7,55	8,9

Таблица4 - Радиусы поражения ВТП для различной массы ГВС

Масса ГВС, кг	Радиусы поражения ВТП 4-х степеней тяжести поражения			
	R_{IV}	R_{III}	R_{II}	R_I
1	0,39	0,44	0,75	1,03
2	0,62	0,92	1,10	1,49
3	0,78	1,22	1,37	1,84
4	0,94	1,026	1,6	2,14
5	1,07	1,16	1,8	2,4
6	1,19	1,3	1,99	2,65
7	1,29	1,4	2,15	2,86
8	1,4	1,52	2,32	3,08
9	1,5	1,63	2,47	3,22
10	1,59	1,72	2,61	3,45

Таким образом, результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что рассматриваемый методический подход к проведению прогнозной экспресс-оценки взрывоопасности химических производств правомерно использовать в практической деятельности.