

5. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЕЙ РИСКОВ И РАСЧЕТА ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИСТОЧНИКОВ ОПАСНОСТИ НА РАЗЛИЧНЫЕ ГРУППЫ РИСКА. ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ АЛГОРИТМОВ.

5.1. Основные положения методов построения полей потенциального риска.

Согласно РД 08-120-96 при проведении декларирования опасных производственных объектов следует рассматривать следующие количественные показатели риска:

Индивидуальный риск - частота поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности.

Коллективный риск - ожидаемое количество смертельно травмированных в результате возможных аварий за определенный период времени.

Социальный риск - зависимость частоты событий, в которых пострадало на том или ином уровне число людей, больше определенного, от этого определенного числа людей.

Потенциальный территориальный риск - пространственное распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня.

Рассмотрим взаимосвязи между этими показателями. При проведении анализа риска определяются различные сценарии аварий. Каждому сценарию аварии предписывается своя частота реализации (λ , 1/год) и вероятностная зона поражения ($P(x,y)$), которая рассчитывается исходя из физических процессов протекания аварий и характеристики негативного воздействия на человека или другие субъекты воздействия. Для получения поля потенциального территориального риска $R(x,y)$ проводится суммирование всех вероятностных зон поражения с учетом частоты их реализации на рассматриваемой территории (в предположении малости произведения $\lambda_j * P_j(x,y)$):

$$R(x,y) = \sum_1^j \lambda_j * P_j(x,y) \quad (5.1.1)$$

Для оценки риска необходимо построить распределение персонала или населения ($N(x,y)$) на рассматриваемой территории.

Это распределение отражает количество субъектов воздействия, находящихся в конкретном месте в среднем в год. Тогда коллективный риск (F) определяется как

$$F = \int_S N(x, y) * R(x, y) \quad (5.1.2)$$

Для определения среднего показателя индивидуального риска для субъектов воздействия (N) из всех субъектов следует выделить только ту часть (N_R), которая подвергается риску. Это связано с тем, что определенная часть субъектов может находиться за пределами негативного влияния опасного производственного объекта.

$$N_R = \int_S N(x, y), \quad \in R(x, y) > 0 \quad (5.1.3)$$

Средний индивидуальный риск оценивается как R_{ind} = F/N_R. Кроме показателя среднего индивидуального риска, зная N(x,y) и R(x,y), можно построить распределение субъектов воздействия по уровням риска (N(R)), N-R диаграмму. Эта информация важна для оценки количества субъектов, находящихся под высоким уровнем риска. Более того, распределение субъектов по территории весьма неравномерно и по этой причине в ряде случаев все субъекты могут быть разбиты на группы по их территориальной или производственной специфике. Для каждого территориального распределения N_r(x,y) групп субъектов можно определить показатели коллективного (F_r) и индивидуального R_{r_ind} риска.

Показатели социального риска определяются исходя частоты реализации (λ, 1/год) и вероятностной зоны поражения (P(x,y)) для каждого сценария аварии с учетом распределения субъектов N(x,y) на рассматриваемой территории. Количество пострадавших (N*) при конкретном сценарии аварии рассчитывается по формуле:

$$N_* = \int_S N(x, y) * P(x, y) \quad (5.1.4)$$

а частота этого события есть λ. Рассчитав количество пострадавших для всего спектра сценариев (J), можно построить F-N диаграмму.

Далее рассматриваются алгоритмы построения вероятностных зон поражения при авариях с выбросом токсикантов.

5.2. Методические особенности расчета распространения (рассеивания) выбросов в атмосфере

Проблема турбулентного переноса и рассеивания различных примесей в атмосфере относится к числу наиболее сложных проблем современной науки. Ее решению посвящено весьма значительное число как фундаментальных, так и прикладных исследований, обзор которых дан в [1-4]. Поэтому в настоящей работе акцентируется внимание только на тех ее аспектах, которые имеют выраженный методический характер и непосредственно влияют на достоверность построения полей токсического поражения и расчет показателей риска.

Размеры зоны токсической опасности при выбросах токсиканта зависят как от мощности выброса, так и от характеристик атмосферного переноса, прежде всего от скорости ветра и от категории (класса) устойчивости (стабильности) атмосферы. Категории различаются в основном интенсивностью вертикального перемешивания воздуха. Наиболее неустойчивая категория “А” отмечается при слабом ветре и сильной солнечной радиации, когда воздух, нагретый теплом от земной поверхности, всплывает. Обычно это состояние возникает после полудня или несколько раньше. Категория “С” наблюдается при усилении ветра от умеренного до сильного и чаще всего вечером при ясном небе или днем при низких кучевых облаках, а также летними ясными днями при высоте солнца $15\div 30^\circ$. Нейтральная категория “D” соответствует условиям сплошной облачности как днем, так и ночью, когда влияние прямых солнечных лучей незначительно. Устойчивые категории “E” и “F” фиксируют обычно ночью при чистом небе или слабой облачности, когда земная поверхность выхолаживается и над ней устанавливается инверсионный слой. Естественная конвекция при этом подавляется. Стабильность повышается с ростом скорости ветра и снижением интенсивности солнечного облучения. Облачность проявляется по-разному. Ночью ее снижение усиливает охлаждение Земли, образование температурной инверсии. Днем, наоборот, конвективные потоки и неустойчивость усиливаются.

В литературе нет общепринятого критерия определения категорий стабильности [5], однако большинство исследователей пользуются простейшей классификацией (Паскуилла) по вертикальному градиенту температур – см. таблицу 5.2.1.

Классификация классов устойчивости по Паскуиллу

Градиент температуры ($\Delta T/\Delta Z$), град./100м	Класс устойчивости
$<-1,9$	А – сильная конвекция
$-(1,9\div 1,7)$	В – конвекция
$-(1,7\div 1,5)$	С – умеренная конвекция
$-(1,5\div 0,5)$	Д – нейтральная
$-0,5\div +1,5$	Е – инверсия
$+(1,5\div 4,0)$ и более	F – сильная инверсия

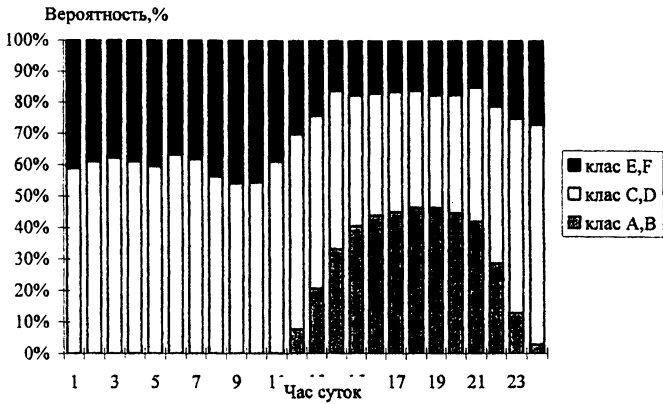
Поскольку состояние устойчивости атмосферы по существу определяется интенсивностью вертикальных конвективных течений, оно может существенно измениться и в течение суток. Характерное распределение стабильности атмосферы в течение дня для средних широт представлено на рис. 5.2.1 для различных времен года. Как видно, распределение состояний устойчивости атмосферы в холодное и теплое время года весьма отличаются. Так, в холодное время года доминируют нейтральное и стабильное состояния атмосферы, а в теплое время года: ночью – стабильное, а днем – неустойчивое. Для мощных вертикальных высокоскоростных выбросов или высокотемпературных выбросов, а также в случаях расположения источника выброса на значительной высоте от поверхности земли весьма важным является учет зависимости слоя перемешивания (приземный слой атмосферы с примерно постоянным касательным напряжением сдвига) от состояния атмосферы. По данным зарубежных исследователей высота слоя перемешивания в среднем изменяется от 100 м ночью до 2000 м в дневное время [6]. При этом максимальное значение высоты слоя перемешивания достигается через 3-4 часа после восхода солнца. На рис. 5.2.2 дано распределение этого параметра в зависимости от условий стабильности атмосферы.

Для описания зависимости реализации того или иного класса устойчивости атмосферы от скорости ветра “U” были проанализированы данные станций наблюдений в США [7] и в РФ (Обнинский ИЭМ) [8]. Результаты представлены на рис. 5.2.3. Значительное их различие свидетельствует о необходимости использования только “местной” метеоинформации, строго

соответствующей определенному типу земной поверхности (равнинная, холмистая и т.д.).

Влияние состояния земной поверхности проявляется также и в эффекте торможения движения воздушных масс, который характеризуется, как правило, так называемым “параметром шероховатости” (Δ_0) в зависимости от структуры ландшафта и сезона в разрезе года. Наиболее характерные значения Δ_0 даны в таблице 5.2.2.

(ноябрь-апрель).



(май-октябрь)

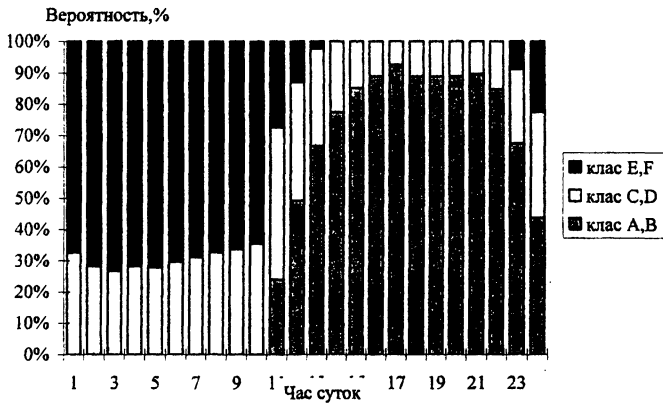


Рисунок 5.2.1. Распределение частоты реализации различных классов устойчивости атмосферы в зависимости от времени суток.

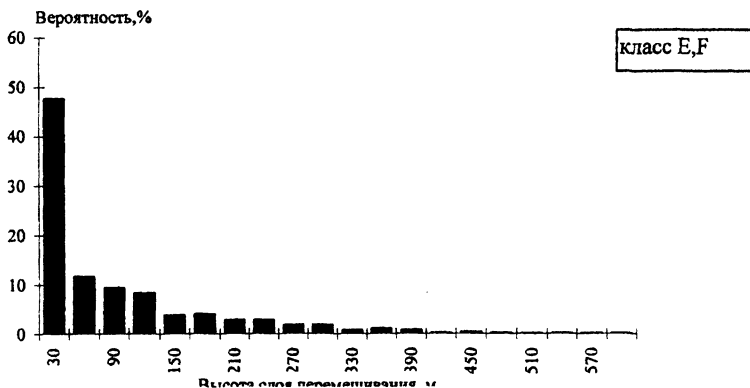
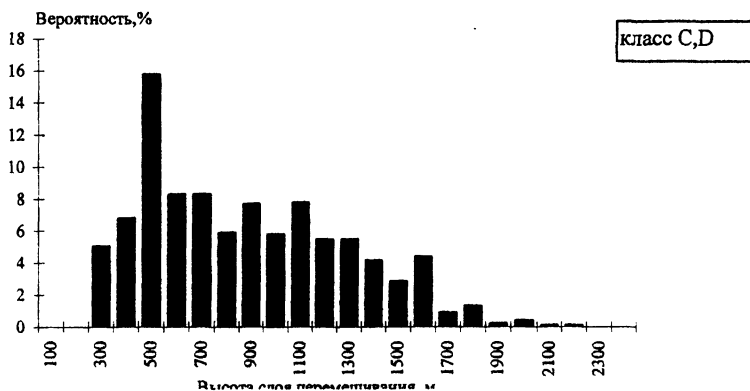
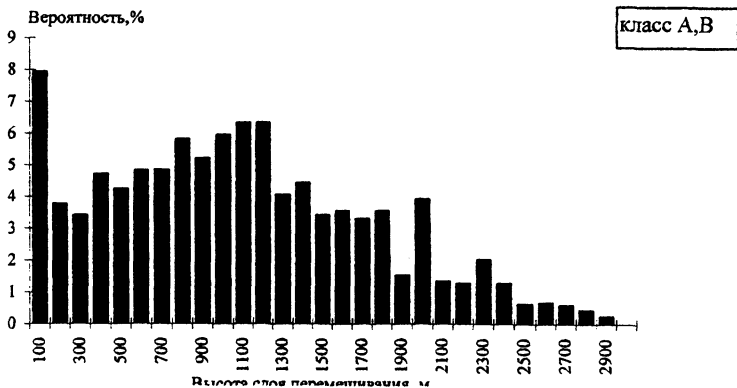
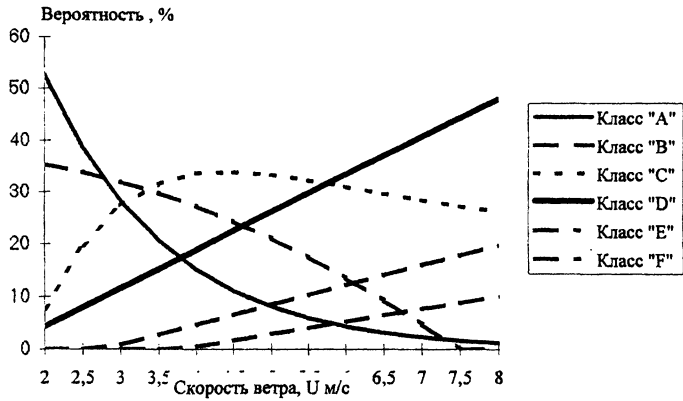


Рисунок 5.2.2. Распределение частоты реализации различной высоты слоя перемешивания в случае устойчивых атмосферных условий

А



Б

U м/с	апрель-сентябрь (IV-IX)						октябрь-март (X-III)					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
0-1	1.4	7.0	29.8	23.7	4.0	34.1	0.0	0.1	5.3	17.2	20.8	56.6
2-3	3.2	10.5	36.5	28.7	3.8	17.3	0.0	0.0	5.8	23.0	26.0	45.2
4-5	2.2	12.4	39.6	31.0	3.7	11.1	0.0	0.1	6.4	26.0	28.1	39.4
6-7	4.3	11.9	39.4	31.5	3.4	9.5	0.1	0.2	6.7	27.3	29.0	36.7
8-10	4.3	12.2	40.4	32.8	3.7	6.6	0.0	0.2	5.9	26.0	27.2	49.7

Рисунок 5.2.3. Распределение классов устойчивости в зависимости от скорости ветра.

(по данным: А – Р.Макнаут, Б – Бызова)

Таблица 5.2.2.

Зависимость параметра шероховатости от типа ландшафта и сезона.

Ландшафт	Сезон	$\square_{0, \text{ м}}$
Городской, лиственные и хвойные леса, залесенные болота	независимо от времени года	1.00
Сельскохозяйственный	весна	0.03
	лето	0.25
	ранняя осень	0.10
	поздняя осень	0.005
	зима	0.001
Пастбища	весна	0.02
	лето, осень	0.05
	зима	0.001
Болота	весна, осень	0.1
	лето	0.15
Смесь сельскохозяйственных культур с пастбищами	весна	0.03
	лето	0.1
	ранняя осень	0.08
	поздняя осень	0.02
	зима	0.001

Известно, что скорость ветра существенно изменяется с высотой. В прикладных исследованиях наиболее часто используется степенная зависимость вида

$$U(z) = U_0 (z/z_0)^p, \quad (5.2.1)$$

где U_0 – скорость ветра на “стандартной” высоте z_0 (обычно $z_0=10$ м).

Значения показателя “р” также зависят от класса устойчивости атмосферы и “шероховатости” поверхности Δ_0 (таблица 5.2.3).

Таблица 5.2.3

Зависимость параметра “р” от величины шероховатости поверхности для различных классов устойчивости атмосферы.

Категория стабильности атмосферы	Параметр шероховатости Δ_0 , м			
	0,01	0,1	1	3
A	0,05	0,08	0,17	0,27
B	0,06	0,09	0,17	0,28
C	0,06	0,11	0,20	0,31
D	0,12	0,16	0,27	0,37
E	0,34	0,32	0,38	0,47
F	0,53	0,54	0,61	0,69

И, наконец, рассмотрим связь между категориями устойчивости атмосферы и характеристиками турбулентного переноса и масштабами переноса примеси. Не меняя существа вопроса, проведем анализ для простейшего случая переноса “нейтральной” примеси от точечного источника постоянной мощности G_0 . Тогда распределение концентрации примеси на оси следа ($y=0$) на поверхности земли ($z=0$) равно

$$\tilde{N}(x, 0, 0) \approx \frac{G_0}{2\pi \cdot U \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)}, \quad (5.2.2)$$

Обычно коэффициенты дисперсии в горизонтальном и вертикальном направлении σ_y и σ_z вычисляют по эмпирическим соотношениям. Наиболее известны номограммы “Гиффорда-Паскуилла” [5], составленные по наблюдениям концентрации на равнинной местности (см. рис. 20) и поэтому названные “сельскими”. Кривые, представленные на рис. 20, могут быть аппроксимированы формулами

$$\sigma_i = \exp[a_i + b_i \ln x + c_i (\ln x)^2], \quad (5.2.3)$$

где x – расстояние, м ($10^2 \leq x \leq 10^4$); $i=y, z$.

Коэффициенты аппроксимации a_i , b_i и c_i даны в табл. 5.2.4.

Таблица 5.2.4.

Константы формул, аппроксимирующих кривые Гиффорда-Паскуилла (по Тэрнеру).

Константы	Категория стабильности атмосферы					
	A	B	C	D	E	F
a_y	-1,104	-1,634	-2,054	-2,555	-2,754	-3,143
b_y	0,9878	1,0350	1,0231	1,0423	1,0106	1,0148
c_y	-0,0076	-0,0096	-0,0076	-0,0087	-0,0064	-0,0070
a_z	4,679	-1,999	-2,341	-3,186	-3,783	-4,490
b_z	-1,7172	0,8752	0,9477	1,1737	1,3010	1,4024
c_z	0,2770	0,0136	-0,0020	-0,03116	-0,0450	-0,0540

Бриггс провел аналогичные наблюдения в городской местности и поэтому его коэффициенты иногда называют “городскими”. Для нестабильной атмосферы городские коэффициенты σ_y выше сельских приблизительно до 5 км, но потом существенно снижаются. С учетом стабильности (для категории “F”) позиция превышения городских коэффициентов увеличивается до 40 км. Расхождения коэффициентов σ_z еще более существенны (см. рис. 5.2.4).

Представленные выше данные об изменениях и корреляциях между основными параметрами атмосферного переноса свидетельствуют о необходимости построения предельно четких логических схем различных вариантов (исходов) развития аварийного процесса в атмосфере, построенных по принципу “деревьев событий”. Очевидно также, что по целому ряду характеристик (шероховатость дневной поверхности, функции распределения скорости ветра и классов стабильности атмосферы в разрезе года и др.) “функции переноса” непосредственно связаны и с “функцией источника” (давление насыщенных паров, температура воздуха и поверхности грунта и др.) т.е. с мощностью выброса.

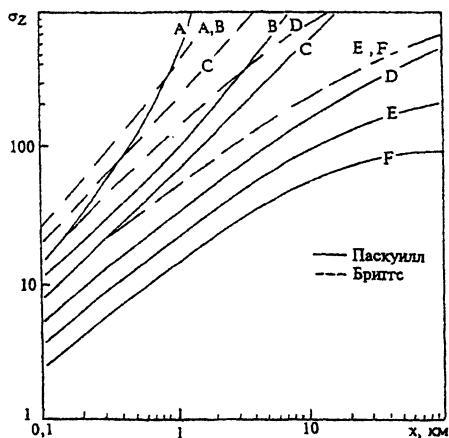


Рисунок 5.2.4. Изменение дисперсионного коэффициента σ_z с расстоянием по ветру.

Проиллюстрируем важность обоснования характерного сценария на примере аварийного струевого выброса токсического газа с постоянной мощностью. Возможная неопределенность – направление выброса. Варианты: 1 – вертикальная свободная струя в сносящем потоке ветра; 2 – “настильная” струя (т.е. ориентированная вдоль земной поверхности) с характерной высотой источника $\sim 1,0$ м. Для корректности сравнения диаметр источника и масса выброса в обоих случаях приняты одинаковыми.

С использованием классических законов сохранения количества движения, массы и неразрывности [9-18] можно получить для вертикального выброса следующие выражения для расчета концентрации токсиканта в расширяющейся струе на высоте “z” от среза трубы радиусом “ r_0 ”

$$C = \frac{C_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_a}} \cdot \frac{r_0}{2\alpha}}{z + r_0 / (2\alpha)} \quad (5.2.4)$$

а также “предельную” высоту подъема струи – Z_* , на которой ее средняя по сечению скорость будет близка к скорости ветра на этой же высоте – $U(Z_*) \equiv U$.

$$Z_* = [r_0 / (2\alpha)] \cdot \left[\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_a} \cdot \frac{W_0}{U}} - 1 \right] \quad (5.2.5)$$

где C_0 ; ρ_0 – концентрация токсиканта и плотность газа (смеси) на срезе; ρ_a – плотность атмосферного воздуха; α – коэффициент “захвата” (эжекции) воздуха (в соответствии с многочисленными экспериментами для свободной турбулентной струи $\alpha \approx 0,06 + 0,08$); W_0 – скорость выброса.

На высоте $Z=Z_*$ струя практически погасит свою исходную кинетическую энергию и дальнейший процесс рассеивания примеси будет подчиняться законам турбулентного обмена в атмосфере, т.е. произойдет смена эжекционного механизма на диффузионный.

Скорость ветра меняется с высотой по известному закону

$$U(z) = U(z_0) \cdot (z/z_0)^p, \quad (5.2.6)$$

где $U(z_0)$ – скорость ветра на высоте флюгера z_0 ; p – показатель степени, зависящий от “шероховатости” (типа) местности и класса устойчивости атмосферы.

Определив значения $Z_* \approx H_{эж}$ и $C(Z_*)$, где по смыслу $H_{эж}$ является высотой эквивалентного источника с мощностью токсиканта Q . можно перейти ко второй стадии анализа – к расчету рассеивания по направлению ветра токсиканта в атмосфере под действием массопереноса и турбулентной диффузии.

На сегодня в литературе [8,19] имеется обширная информация о построении как сложных (трехмерных), так и более простых моделей переноса, основанных на эмпирических данных.

Для прогноза распределения концентраций токсиканта вокруг источника используем простейшую модель Гаусса турбулентной диффузии.

Математическое выражение для концентрации вещества от точечного источника с постоянной мощностью – Q_* (кг/с) записывается в виде:

$$C(x,y,z,t) = \frac{f(A) \cdot Q_*}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5.2.7)$$

где Q_* – мощность источника (кг/сек); σ_y, σ_z – дисперсионные параметры, зависящие от устойчивости атмосферы и расстояния от источника «х»,(м); U – скорость ветра м/сек ; H – высота источника (м); x,y,z – осевая, поперечная и вертикальная координаты; $f(A)$ – доля примеси в слое перемешивания (“А”– высота слоя перемешивания).

Эта зависимость применительно к реальным условиям выброса с концентрацией C_0 корректируется введением понятия виртуального источника. В этом случае вычисляют x_0 таким образом, чтобы в точке ($x=0, y=0, z=H$) соблюдалось равенство:

$$C_0 = \frac{f(A) \cdot Q}{2\pi \cdot U \cdot \sigma_y(x_0) \cdot \sigma_z(x_0)} \quad (5.2.8)$$

А при дальнейших расчетах параметры дисперсии корректируются с учетом значения x_0 , т.е. $\sigma_y = \sigma_y(x+x_0)$; $\sigma_z = \sigma_z(x+x_0)$

Как правило для относительно небольших значений высот подъема факела ($H < 100 + 200$ м) $f(A) = 1$.

Для верификации представленной модели были использованы материалы специальных натуральных измерений, проведенных в период аварийного выброса (с 17.10 1982 по 23.12.1982) природного газа с высоким содержанием (25% об) сероводорода на скважине вблизи г. Лоджпул (Канада) [20]. Массовый расход выброса – 54, 2 кг/с; молекулярный вес – 26,2 кг/кмоль; температура – плюс 60 °С ; диаметр отверстия (обсадная колонна) – 216.8 мм; направление выброса вертикальное. Высота источника $H \approx 1$ м); характер местности – лесистая равнина (“шероховатость” – $\Delta_0 = 1$ м).

Для условий проведения эксперимента коэффициенты дисперсии аппроксимировались функциями вида

$$s = \frac{a_1 * x^{a_2}}{(1 + a_3 * x)^{a_4}}. \quad (5.2.9)$$

Дисперсионные характеристики для коэффициента шероховатости $\Delta_0=1.0$ м и времени осреднения $T = 180$ с приведены ниже в табл. 5.2.5 (Alberta Environment Sigma Formulae, User Guide.).

Таблица 5.2.5

Класс	σ_y				σ_z			
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_1	a_2	a_3	a_4
A	0.5773	0.88	0.0	1.0	0.6148	0.83	0.0	1.0
B	0.4398	0.88	0.0	1.0	0.5388	0.77	0.0	1.0
C	0.2749	0.88	0.0	1.0	0.5327	0.72	0.0	1.0
D	0.1870	0.88	0.0	1.0	0.4560	0.68	0.0	1.0
E	0.1374	0.88	0.0	1.0	0.3478	0.65	0.0	1.0
F	0.0935	0.88	0.0	1.0	0.3093	0.58	0.0	1.0
Класс устойчивости			A	B	C	D	E	F
Коэффициент p			0.17	0.17	0.20	0.27	0.38	0.61

Данные замеров максимальных концентраций H_2S , а также результаты математического моделирования сведены в таблицу 5.2.6. Как показал дополнительный анализ, практически все существующие на сегодня инженерные методики расчета концентраций сероводорода дают значительные расхождения с экспериментом. Поэтому в таблице 5.2.7 представлены результаты сравнительных расчетов только по модели, разработанной А.С.Едигаровым [2] (полномерная система законов сохранения в форме дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка), а также модели «EPA-US» (США).

Как видно, изложенная выше модель вертикального выброса достаточно хорошо соответствует данным эксперимента. Гауссова модель для наземного “источника” в спутном потоке достаточно хорошо апробирована и в специальной верификации не нуждается.

Таблица 5.2.6

Верификация моделей расчета приземных концентраций сероводорода.

КА	А,м	U, м/с	Т,°К	L,км	Концентрация, ppm			
					C _{exp}	C ₁	C ₂	C ₃
5	300	3.9	275.0	13.0	7.9	7.1	11.8	14.3
6	92	2.2	269.0	15.0	8.5	11.9	9.5	5.5
6	199	3.1	271.0	21.0	1.5	8.8	8.0	9.0
5	317	3.9	273.0	17.0	9.4	4.9	9.8	12.2
6	84	1.9	268.0	17.0	6.7	10.6	6.6	3.6
6	50	.8	264.0	15.0	8.2	8.6	1.4	.0
6	61	1.1	261.0	17.0	15.2	8.7	2.9	.3
3	203	1.7	265.0	8.0	5.8	6.1	2.1	6.7
4	402	1.7	265.0	8.0	7.6	10.6	7.9	19.5
6	79	1.7	254.0	8.0	17.5	10.3	10.1	2.0
6	79	1.7	253.0	14.0	12.9	11.4	7.6	2.9
6	105	2.8	250.0	13.0	13.4	14.5	11.0	10.8
6	105	2.8	248.0	21.0	1.7	9.3	8.2	8.8
6	105	2.8	248.0	22.0	8.5	8.9	7.9	8.6
6	99	2.5	248.0	16.0	10.5	12.2	7.5	8.5
6	92	2.2	248.0	19.0	14.0	10.5	7.6	6.3
5	280	2.8	255.0	18.0	17.5	5.5	9.2	9.2
4	851	3.6	263.0	21.0	4.0	1.9	1.8	3.9
6	99	2.5	256.0	18.0	10.5	10.8	7.2	7.7
5	287	3.1	262.0	18.0	9.9	5.2	8.5	10.0
5	1039	4.4	263.0	19.0	6.4	3.9	7.8	12.5
6	92	2.2	260.0	17.0	12.9	11.2	8.6	5.8
6	71	1.4	265.0	22.0	8.2	8.3	4.4	1.2
4	780	3.3	262.0	21.0	2.4	2.0	2.0	4.1
4	733	3.1	263.0	17.0	9.9	2.9	2.6	5.6
Σ(C _{exp} - C _i) ² сумма квадратов отклонений					511	626	1251	

Обозначения: КА – класс устойчивости атмосферы: 1 -А, 2 – В,...,6 – F; А – высота слоя перемешивания; U – скорость ветра, T – температура окружающей среды; L – расстояние на котором определялась концентрация C_{exp} – эксперимент, C_1 – рекомендуемая модель, C_2 – модель ВНИИГАЗА (А.С.Едигаров); C_3 – «EPA-US».

Таблица 5.2.7

Сравнение площадей (га) контуров с концентрацией $C > 20$ ppb для различных вариантов струевого выброса и условий состояния атмосферы.

U, м/с	Вертикальная струя			Горизонтальная струя		
	B	D	F	B	D	F
1	0	0	0	11.1	26.7	126.7
2	1.3	4.4	4.5	5.3	12.5	56.5
5	1.3	3.2	9.6	2.0	4.5	19.2
10	0.79	1.9	7.4	0.95	2.1	8.5

Приведенный пример показывает важность учета реального многообразия вариантов развития аварийных ситуаций и адекватного задания начальных условий и технологической специфики изучаемого объекта.

На основании изложенного можно сделать вывод о необходимости в каждом конкретном случае тщательной детализации возможных сценариев развития аварий и их исходов и последующего выбора математических моделей только после предварительного анализа всей совокупности сопутствующих процессов.

5.3. Пример прогноза масштабов зон токсикологической опасности.

Перейдем далее к непосредственному прогнозу масштабов зон потенциального токсического поражения на примере двух сценариев гипотетических аварий с выбросом зарина через отверстие с эквивалентным диаметром 1 м на высоте 10 м и на уровне земли.

Концентрация зарина в выбросе составляет 500 ppm, интенсивность выброса - 24.57 г/с.

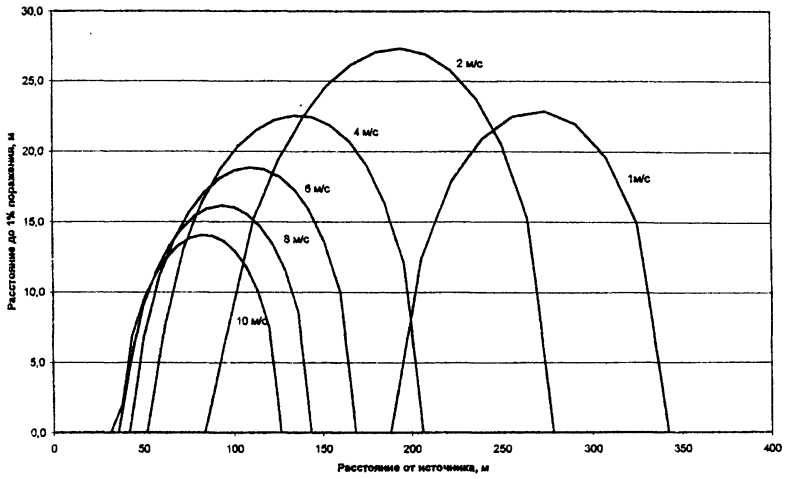
Все расчеты проводились постоянного выброса с временем воздействия на человека 10 минут для шести классов устойчивости атмосферы («А», «В», «С», «D», «Е», «F») в соответствии с классификацией Гиффорда-Паскуилла при изменении скорости ветра от 1м/с до 10 м/с. Вертикальные распределения скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии в невозмущенной атмосфере рассчитывались в зависимости от класса устойчивости атмосферы по известным метеорологическим зависимостям, приведенным например в [21]. Параметр шероховатости местности был принят равным 1 м.

В качестве критерия выбора границы зоны использовалось значение $N=1\%$ (один процент пораженного населения), которому соответствовала концентрация зарина 2.02 мг/м³.

Результаты расчета зоны 1% поражения при аварийном выбросе представлены на рис. 5.3.1-5.3.2 в виде изолиний приземной концентрации ($C=2.02$ мг/м³) для различных классов устойчивости атмосферы и скоростей ветра. Анализ кривых на рис. 5.3.1-5.3.2 свидетельствует о том, что независимо от скорости ветра размер зоны поражения увеличивается с повышением устойчивости атмосферы. Например, протяженность зоны поражения для настильного выброса на уровне земли изменялась от 480 м при неустойчивом состоянии атмосферы до 3700 м при инверсии. Для вертикального высотного выброса максимальные зоны получены при скоростях 2-4 м/с (рис. 5.3.1). Интересно отметить, что при малых скоростях ветра для вертикально направленного выброса, порядка 1 м/с, на уровне земли как правило отсутствуют опасные концентрации ОВ. Это непосредственно связано с начальным вертикальным подъемом примеси. Численные исследования показали, что высота динамического подъема факела существенно увеличивается при снижении скорости ветра, вследствие чего приземные концентрации ОВ могут уменьшаться до безопасного уровня.

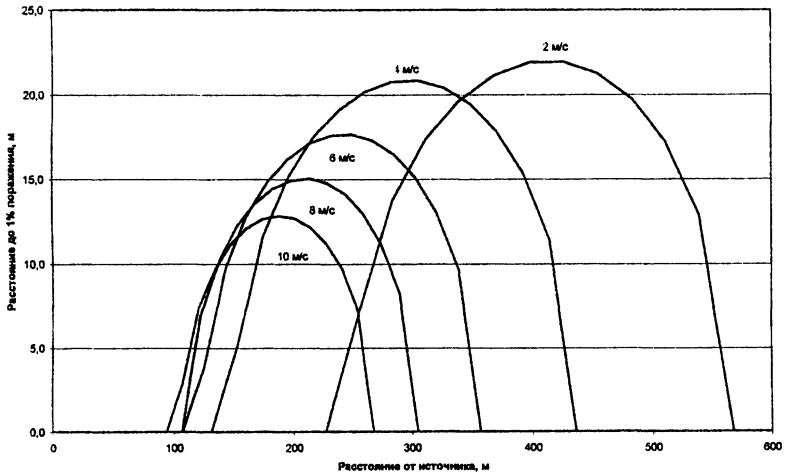
Класс устойчивости атмосферы "В"

A



Класс устойчивости атмосферы "D"

B



Класс устойчивости атмосферы "F"

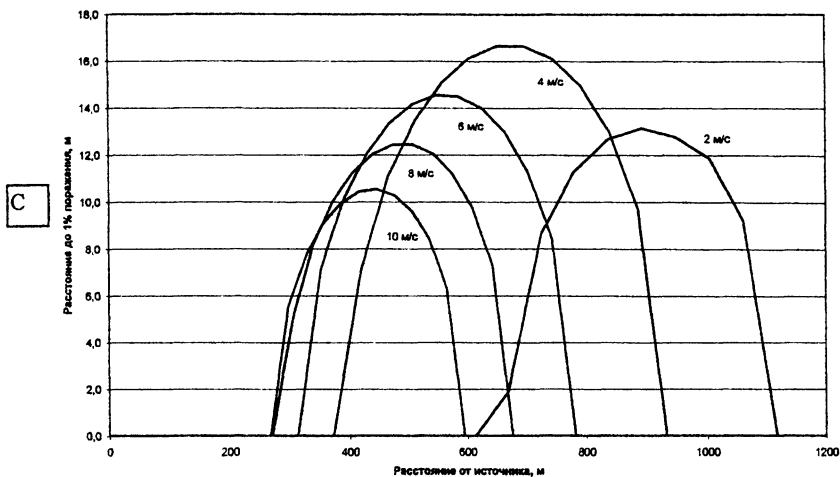
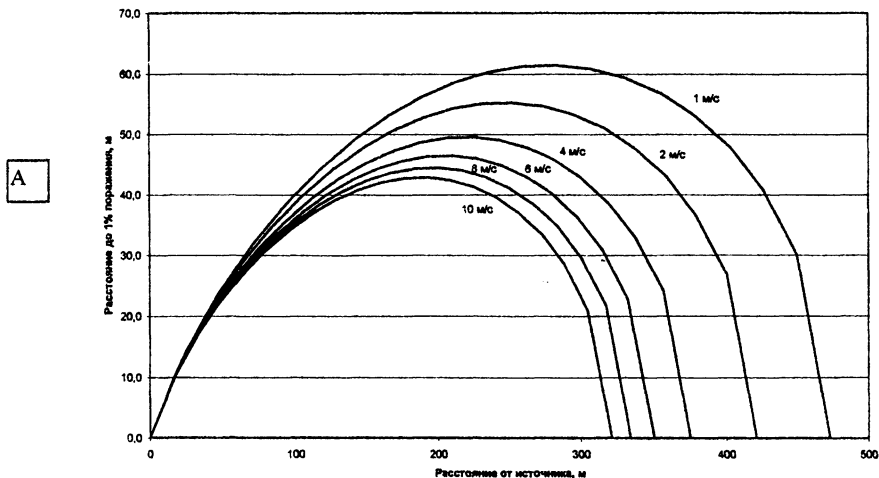


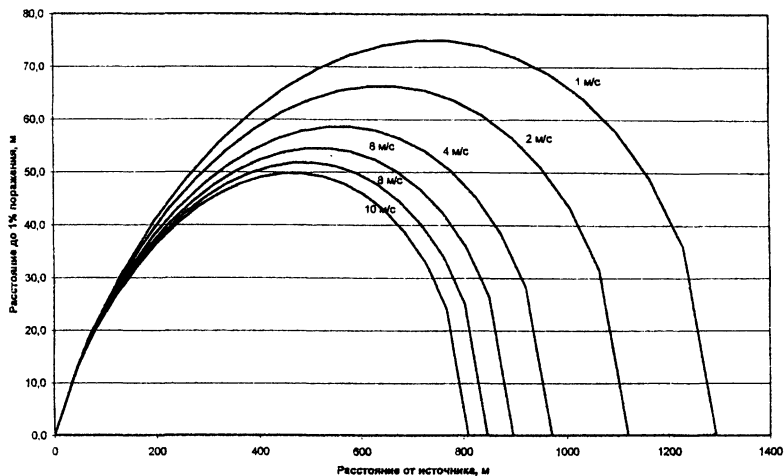
Рисунок 5.3.1. Зоны 1% поражения при аварийном выбросе зарина на высоте 10 м вертикально вверх со скоростью 10 м/с через отверстие с диаметром 1 м и начальной концентрацией в струевом выбросе 500 ppm.

Класс устойчивости атмосферы "B"



Класс устойчивости атмосферы "D"

В



Класс устойчивости атмосферы "F"

С

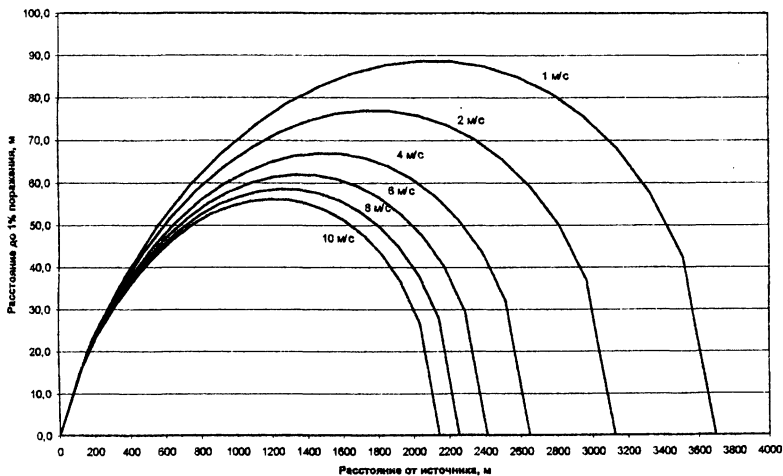


Рисунок 5.3.2. Зоны 1% поражения при аварийном настильном выбросе зарина на уровне земли со скоростью 10 м/с через отверстие с диаметром 1 м и начальной концентрацией в струевом выбросе 500 ppm.

Анализ численных расчетов аварийных выбросов зарина свидетельствует о существенном влиянии стадии струйного рассеивания на формирование зон поражения. Первоначальный подъем факела, сопровождающийся интенсивным тепломассообменом с окружающим воздухом, приводит к активному разбавлению струи, в результате чего концентрация ОВ в конце струйной области (где скорость потока сравнивается со скоростью ветра) существенно снижается. Неучет указанных закономерностей распространения струйных выбросов может привести к значительным погрешностям в итоговых размерах зон поражения. Например, использование классического уравнения распределения концентрации в пространстве (уравнение Сеттона) без учета начального подъема и разбавления факела приводит для указанного сценария вертикального выброса к зоне поражения аналогичной с настильным выбросом. С другой стороны, попытка учесть начальный подъем факела с помощью введения в уравнение Сеттона дополнительной высоты подъема факела, рассчитанной по эмпирическим соотношениям Бригса, как это предлагается в нормативной методике рекомендованной Агенством по охране окружающей среды США [22], приводит к значительному занижению размеров зоны поражения для рассматриваемого случая. Можно привести еще много примеров, когда различные инженерные методики, основанные на схематизации процесса рассеивания и не учитывающие взаимодействие турбулентных течений истекающего газа и воздуха, дают противоречивые результаты. Так, глубина зоны 1% поражения населения (для указанного сценария), рассчитанная по нормативной методике ОНД-86 [23], составила 1.6-1,8 км, по методике Госкомгидромета РД 52.04.253-90 [24] эта величина составила – 5-5.6 км, по методике [25] зона поражения была – >60 км. Это свидетельствует о необходимости детальной верификации моделей рассеивания газа в атмосфере и сценариев возникновения аварий с учетом не только метеорологических параметров переноса, но и начальной концентрации вещества и струйного механизма истечения.

5.4. Обобщенный алгоритм расчета вероятности гибели людей (риска) при возникновении выбросов токсикантов

В соответствии с принятой в международной практике терминологией будем трактовать понятие “индивидуальный риск” как вероятность смертельного поражения (гибели) человека, связанной с возникновением аварийного выброса опасного вещества и его распространения в окружающем пространстве.

Смертельное поражение человека, находящегося в районе источника токсической опасности, зависит от многих факторов: от общих объемов и продолжительности выброса токсического вещества при аварии; от состояния атмосферы, скорости и направления ветра во время выброса и распространения вещества в атмосфере; от типа (специфики воздействия) самого вредного вещества; от места нахождения человека по отношению к источнику в момент аварии; наконец, от состояния здоровья самого человека и от его поведения во время аварии.

Все эти факторы можно разделить на две группы:

1. технологические и климатические факторы, не зависящие от человека, подвергающегося негативному воздействию;
2. факторы, которые в той или иной степени определяются или зависят от человека – факторы жизнедеятельности, местонахождения, поведения, состояния здоровья и т.д.

На факторы 1-ой группы (интенсивность и продолжительность выброса, а также тип токсического вещества, состояние атмосферы, направление и сила ветра, время существования вещества в атмосфере и т.д.) человек, находящийся в районе аварии, повлиять не может. С точки зрения абстрактного человека, попавшего в зону аварии, такие факторы являются независимыми от него, т.е. объективными.

Реализация того или иного объективного фактора (из общей группы) носит случайный характер. Мерой случайности является частота или вероятность его появления.

Вероятность поражения (риск), определенная с учетом только объективных факторов, будет являться потенциальным риском.

Поле потенциального риска позволяет оценить общую картину опасности или поражения при возникновении аварии и его можно

рассматривать как некоторый фон опасности вокруг объекта с токсическим веществом.

При вычислении поля потенциального риска можно, если это необходимо, ставить дополнительную задачу – задачу корректировки потенциального поля (фона опасности) с целью его уменьшения. Корректировка поля опасности должна заключаться в изменении количественных характеристик “управляемых” объективных факторов, если таковые есть и (если это возможно) с помощью технических средств (например, объем выброса, время выброса и т.д.) и/или в изменении (снижении) частоты их появления.

Далее подробно рассмотрим непосредственно задачу вычисления потенциального риска в предположении, что все частоты и/или вероятности возникновения и существования объективных факторов, влияющих на токсическое поражение человека, нам известны.

Итак, считаем известными:

1. Частота возникновения аварии с выбросом токсичного вещества в атмосферу – λ (1/год).
2. Объемы (интенсивность) выброса токсичного вещества, которые могут изменяться в зависимости от сценария аварии в некотором диапазоне: $G_{\min} \leq G \leq G_{\max}$.

Предполагается, что выделен набор характерных объемов выброса токсичного вещества для данного источника опасности

$$G_{\min} \leq G_k \leq G_{\max} \quad (k=1 \dots K). \quad (5.4.1)$$

Каждый из этих объемов может реализоваться со своей частотой g_k ,

причем $\sum_{k=1}^K g_k = 1$.

3. Данные о розе ветров и состоянии атмосферы в районе источника опасности:

- ♦ набор характерных для данной местности скоростей ветра $0 \leq U_\ell \leq U_{\max}$ ($\ell=1 \dots L$);

- ◆ набор характерных состояний атмосферы – обычно максимальное число классов устойчивости атмосферы принимается равным шести (по Паскуиллу): А, В, С, D, E, F;
- ◆ общее число румбов, из которых состоит роза ветров – М (чаще всего 8 или 16);

Известно, что каждая из скоростей ветра U_ℓ реализуется в любом из географических направлений, т.е. внутри каждого из румбов с порядковым номером – m (m=1...M) с частотой $P_{\ell,m}^n$, где n = 1...N – номер временного интервала в разрезе года (сезона или месяца), требующего дифференциации по сочетанию метеорологических параметров для данной местности.

Набор этих частот

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L P_{\ell,m}^n = 1 \quad (5.4.2)$$

Учет состояний атмосферы необходимо проводить согласно известной информации о частоте повторяемости того или иного класса устойчивости атмосферы в зависимости от скорости ветра, причем для данной местности и желательно для каждого временного интервала. Предположим, что такие частоты есть – $(\bar{P}_{l,a}^n, \ell=1...L, a=1...6), n=1...N)$, где “a_j” – определяет класс устойчивости атмосферы: А – a=1; В – a=2; С – a=3; D – a=4; E – a=5; F – a=6,

причем $\sum_{a=1}^6 \bar{P}_{\ell,a}^n = 1$

Для выделения класса устойчивости атмосферы в условиях влияния других факторов необходимо определить условную частоту, например, повторяемости скорости ветра при классе устойчивости атмосферы “a_j”. Условная частота для скорости ветра будет иметь вид:

$$P_{\ell,m/a}^n = P_{\ell,m}^n \cdot \bar{P}_{\ell,a}^n / \left(\sum_{a=1}^6 \bar{P}_{\ell,a}^n \right). \quad (5.4.3)$$

Очевидно, что

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{\ell=1}^L \sum_{a=1}^6 P_{\ell, m/a}^n = 1 \quad (5.4.4)$$

Приведенные выше частоты полностью описывают основные (наиболее общие) “объективные” факторы, влияющие на величину потенциального риска.

Прежде чем перейти к процедуре вычисления количественных показателей потенциального риска, необходимо оценить размер области (территории), в каждой точке которой риск возможен, т.е. имеет ненулевое значение. Для этого нужно знать максимальное расстояние от источника аварии, на которое может распространиться вредное вещество (с определенным уровнем концентрации) в атмосфере, т.е.

$$R = \max(r_{k, \ell/a}^n), \quad k=1 \dots K, \quad \ell=1 \dots L, \quad a=1 \dots 6, \quad n=1 \dots N \quad (5.4.5)$$

где $(r_{k, \ell/a}^n)$ – расстояние, на которое распространяется опасное облако, при сценарии аварии k (то есть соответствующей интенсивности выброса), скорости ветра U_{ℓ} , классе устойчивости атмосферы “ a ”, во временном интервале (в разрезе года) – n . Эти расстояния определяются по результатам проведения численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих закономерности истечения и рассеяния (распространения) в атмосфере опасного вещества и учитывающих характерные диапазоны изменения объективных факторов (k, ℓ, a, n).

Таким образом, поле риска будет ограничиваться кругом радиуса R , с центром в источнике аварии.

При расчете потенциального риска необходимо учесть еще один фактор, определяющий уровень токсичности самого вещества. Этот фактор носит название “пробита” – P_R , учитывает специфические особенности физиологического воздействия и количество поглощенного вещества (дозу), которое может смертельно воздействовать на “абстрактного” человека, находящегося в зоне аварии, и имеет вид:

$$P_{R, n, k, \ell, a}(x, y) = \alpha + \beta \cdot \ln[D_{n, k, \ell, a}(x, y)], \quad (5.4.6)$$

где $D_{n,k,t,a}(x,y)$ – токсодоза вредного вещества – интегральная величина

$$D_{n,k,t,a}(x,y) = \int_0^{T_k} C_{n,k,t,a}^v(x,y,t) dt, \quad (5.4.7)$$

где $C_{n,k,t,a}^v(x,y,t)$ – функция концентрации токсичного вещества в точке (x,y) , T_k – время экспозиции; α, β, ν – константы, характеризующие как специфику токсиканта, так и выделенную группу людей (группу риска); (x,y) – координаты предполагаемого места нахождения абстрактного человека внутри круга радиуса R .

Обычно в специальной медицинской литературе для характеристики острого ингаляционного воздействия газообразных токсических веществ приводятся значения концентраций, вызывающих 50% поражение при экспозиции в течение некоторого времени “Т” (LCT50). Эта характеристика по существу определяет интегральную меру токсиканта, при получении которой возможен летальный исход у 50% субъектов в группе (например, методика "ТОКСИ").

Знание функции пробита в точке $P_R(x,y)$ позволяет определить вероятность (степень) поражения в точке через интеграл Гаусса:

$$A_{n,k,t,a}(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{P_{n,k,t,a}} e^{-(z-5)^2/2} dz \quad (5.4.8)$$

Особо отметим практический прием проверки правильности использования из литературы констант пробит-функции. Если известны константы (α, β, ν) , а также значение LCT50, и при подстановке концентрации для 50% поражения в уравнение для пробит функции получится значение $P_R = 5$, то константы применяются для выражения $A(P_R-5)$. Если же $P_R = 0$, то – $A(P_R)$.

Для различных токсичных и вредных веществ пробит-функция имеет различные константы, определяемые в результате специальных медико-биологических исследований и отнесенные к

среднестатистическому составу населения или, если это оговорено специально, к определенному контингенту (группе) людей. В таблице 5.4.1 приведены константы для вычисления пробит-функции летального поражения для некоторых химических веществ, рекомендованные Центром изучения безопасности химических процессов Американского института инженеров-химиков для технического персонала заводов [26].

Таблица 5.4.1

Константы для вычисления пробит – функции летального поражения технического персонала (С - ppm, Т – мин).

Вещество	α	β	ν
Акролеин	-9.931	2.049	1
Акрилонитрил	-29.42	3.008	1.43
Аммиак	-35.90	1.85	2
Бензол	-109.78	5.3	2
Бром	-9.04	0.92	2
Угарный газ	-37.98	3.7	1
Четыреххлористый углерод	-6.29	0.408	2.5
Хлор	-8.29	0.92	2
Формальдегид	-12.24	1.3	2
Соляная кислота	-16.85	2.00	1.00
Цианистоводородная кислота	-29.42	3.008	1.43
Фтористоводородная кислота	-35.87	3.354	1.00
Сероводород	-31.42	3.008	1.43
Бромистый метил	-56.81	5.27	1.00
Метилизоцианат	-5.642	1.637	0.653
Двуокись азота	-13.79	1.4	2
Фосген	-19.27	3.686	1
Окись пропилена	-7.415	0.509	2.00
Двуокись серы	-15.67	2.10	1.00
Толуол	-6.794	0.408	2.5

Как уже отмечалось, результат токсикологического воздействия зависят от текущего состояния человека, его возрастных и физических данных и ряда других особенностей. Это приводит к тому, что зачастую эффект воздействия может изменяться в 2 – 5 раз при поглощении одной и той же дозы токсиканта. Более того в ряде зарубежных работ значения пробит-функций приведены с учетом поведения людей и их физиологической активности [27].

Этап выделения и обоснования критериев негативного токсического воздействия на человека во многом определяет получаемые в дальнейшем количественные характеристики риска. Так, например, распространение критериев токсического воздействия, принятых для технического персонала предприятия, на все население региона приводит к значительному занижению показателей риска.

С использованием данных работ [28] ниже дан пример обоснования критериев негативного воздействия для хлора. Группа риска среди населения, подверженного потенциальному токсическому воздействию, состоит из:

Дети <6 месяцев	0.8%
<12 месяцев	0.8%
12 месяцев-6 лет	7.5%
6 лет-9 лет	8.2%
Пожилые люди >70 лет	8.5%
Люди с хроническими заболеваниями сердца	0.5%
Люди с заболеваниями органов дыхания	0.9%
Люди с ограниченной подвижностью	0.4%
Слепые	0.2%
Взрослые и подростки	72.2%

Для токсических веществ подобного типа мера тяжести последствий определяется скоростью поглощения вещества и может быть выражена (при $C(\tau)=const$) как

$$D \approx \frac{V_a \cdot 10^{-3}}{F_a} \bar{C}^n \cdot \tau, \quad (5.4.9)$$

где V_d – скорость дыхания, л/мин; F_d – площадь поверхности легких, m^2 ; C концентрация токсиканта в воздухе, mg/m^3 .

И скорость дыхания, и поверхность легких обычно коррелируются с общим весом человека (M , кг)

$$V_d = k_1 * M^{0,7}; F_d = k_2 * M^{0,92}, \quad (5.4.10)$$

где k_j – константы, имеющие определенную возрастную дифференциацию.

Таким образом, $D = k_c \cdot M^{0,22} \cdot C^n \cdot t$.

Типовые значения скорости поглощения воздуха на различных этапах жизнедеятельности взрослого человека даны в таблице 5.4.2.

Таблица 5.4.2

Скорость дыхания и поглощения кислорода при различных видах

Вид деятельности	Скорость дыхания, л/мин	Скорость поглощения O_2 , л/мин
Сон	6	0.24
Отдых:		
– в положение сидя	7	0.30
– в положение стоя	8	0.30
Прогулка, 2 мили/час	14	0.650
Прогулка, 4 мили/час	26	1.2
Льжная прогулка	43	2.0
Максимальные физические нагрузки	65-100	3.0-4.0

При оценках масштабов поражения необходимо учитывать, что для рассматриваемого случая особо чувствительная группа населения составляет до 30% от всего контингента.

На основании изложенного были предложены следующие зависимости пробит-функций для хлора:

для взрослых и подростков $P_R = -8.29 + 0.92 * \ln(C^2 t)$

для детей и стариков $P_R = -6.61 + 0.92 * \ln(C^2 t)$.

Сравним эти показатели с соответствующими литературными данными [29-33]:

Eisenberg и др $- P_R = -17.1 + 1.69 * \ln(C^{2.75} t)$

Perry и Articola $- P_R = -36.45 + 3.13 * \ln(C^{2.64} t)$

Rijnmond Report $- P_R = -11.4 + 0.82 * \ln(C^{2.75} t)$

ten Berge $- P_R = -5.04 + 0.5 * \ln(C^{2.75} t)$

Из этих данных можно сделать вывод о том, что, в зависимости от исходных предположений об уязвимости человека, значения функции доза-эффект могут различаться в 4-5 раз.

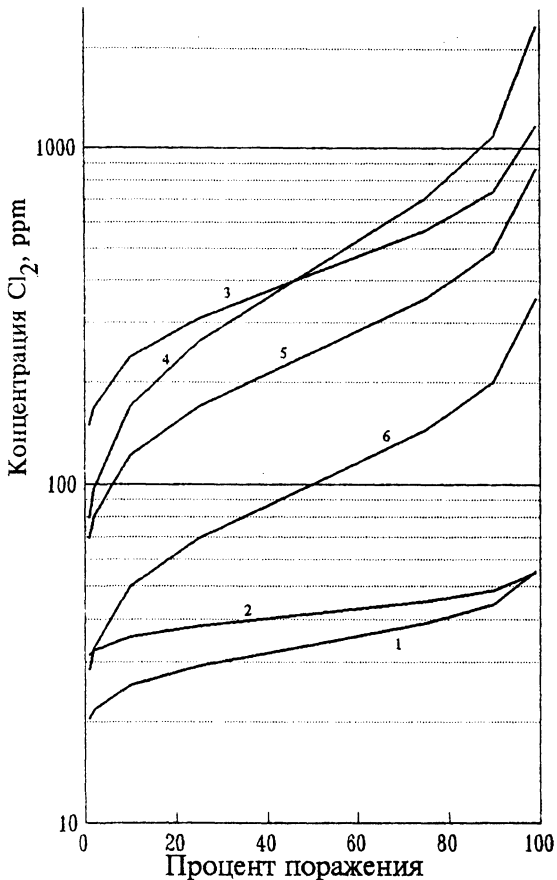


Рисунок 5.4.1. Варианты зависимости процента поражения людей от токсической нагрузки (при 30 мин. экспозиции с постоянной концентрацией) для хлора с различными токсикологическими данными α, β, γ .

№	1	2	3	4	5	6
α	-17.1	- 36.45	-11.4	-5.04	-8.29	-6.61
β	1.69	3.13	0.82	0.5	0.92	0.92
γ	2.75	2.64	2.75	2.75	2	2

В инженерной практике для прогноза эффектов острого токсического воздействия на человека часто используются систематизированные лабораторные материалы, полученные на различных группах животных. Для характерных случаев поражения газообразными токсикантами обычно выбираются материалы по крысам, имеющим близкие к человеку физиологические системы дыхания и кровообращения [1,5,8,34]. При этом за счет корректирующих коэффициентов учитывается более высокая у крыс скорость поглощения или абсорбции – (примерно в 5 раз) и большая интенсивность дыхания в стрессовых ситуациях (примерно в 2 раза). Для принимаемой в качестве типового примера 30-ти минутной экспозиции с постоянной концентрацией

$$LCT50_{чел} \approx \frac{3,3}{10} * LCT50_{крыс} \quad (5.4.11)$$

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что при оценке риска токсического поражения для населения в качестве консервативной оценки наиболее целесообразно принимать критерии воздействия, которые вызывают поражение у наиболее уязвимой части населения (нижние кривые функций поражения).

Представленное выше выражение для $A_{n,k,\ell,a}(x,y)$ учитывает количественные характеристики всех “объективные” факторов (n,k,ℓ,a), влияющих на величину поражения, кроме частотных характеристик этих факторов и направления ветра, характеризующегося случайной величиной $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ($\varphi=0$ принимается за восточное направление).

Поскольку токсическая опасность в виде облака (шлейфа) вредного вещества распространяется в атмосфере в основном по ветру, который изменяет свое направление независимо от параметров источника и случайным образом, то значение доли поражения $A_{n,k,\ell,a}$ в конкретной точке (x,y) будет лишь одним из возможных значений поражения.

Для того чтобы учесть при вычислении $A_{n,k,\ell,a}(x,y)$ направление ветра, необходимо найти зависимость $A_{n,k,\ell,a}$ от полярного угла φ , т.е. определить функцию поражения как функцию от случайной величины φ . Эта зависимость устанавливается с помощью процедуры интерполяции функции $A_{n,k,\ell,a}(x,y)$, которая определена численным решением в прямоугольной сетке (x_i, y_j) , на полярную сетку (ρ_η, φ_μ) .

Таким образом, функция поражения – $A_{n,k,\ell,a}(\rho, \varphi)$ определена как функция случайной величины φ .

Плотность распределения случайной величины φ можно представить на основании метеорологической информации в виде гистограммы – ступенчатой функции (рис. 5.4.2):

$$\Psi_{\ell/a}^n(\varphi) = \left\{ \frac{M}{2\pi} \cdot P_{\ell,m/a}^n, \quad (m-1)\frac{2\pi}{M} < \varphi < m\frac{2\pi}{M}; m = 1 \dots M \right\}, \quad (5.4.12)$$

$$n=1 \dots N, \ell=1 \dots L, a=1 \dots 6$$

Фактически Ψ есть дискретная плотность распределения совокупности случайных, независимых временных и погодных факторов: n, l при условии a и φ , результатом интегрирования (суммирования) которой по всем этим факторам в соответствии с законами вероятности есть 1, т.е.

$$\sum_{n=1}^N \sum_{\ell=1}^L \sum_{a=1}^6 \int_0^{2\pi} \Psi_{\ell/a}^n(\varphi) d\varphi = \sum_{n=1}^N \sum_{\ell=1}^L \sum_{a=1}^6 \sum_{m=1}^M P_{\ell,m/a}^n = 1. \quad (5.4.13)$$

Математическое ожидание токсического поражения в произвольной точке полярной сетки (ρ_η, φ_μ) для условий (n, k, ℓ, a) будет определяться как

$$\bar{A}_{n,k,\ell,a}(\rho_\eta, \varphi_\mu) = \int_0^{2\pi} A_{n,k,\ell,a}(\rho_\eta, |\varphi_\mu - \varphi|) \Psi_{\ell/a}^n(\varphi) d\varphi. \quad (5.4.14)$$

Здесь под интегралом аргумент $|\varphi_\mu - \varphi|$ означает, что функция $A_{n,k,\ell,a}(x, y)$ симметрична относительно оси $\varphi = \varphi_\mu$, поскольку предполагается, что токсическая опасность (токсическое облако) также симметрична относительно этой же оси (рис. 43).

Полное математическое ожидание в точках полярной сетки (ρ_η, φ_μ) учитывает частотные характеристики остальных объективных факторов и имеет вид:

$$\bar{A}(\rho_\eta, \varphi_\mu) = \lambda \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K g_k \sum_{\ell=1}^L \sum_{a=1}^6 \bar{A}_{n,k,\ell,a}(\rho_\eta, \varphi_\mu). \quad (5.4.15)$$

Тем самым определено поле потенциального риска. Изолинии $\bar{A}(\rho_\eta, \varphi_\mu) = \text{const}$ – есть уровни равного риска.

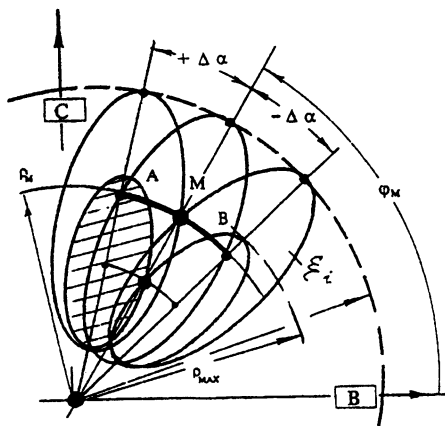
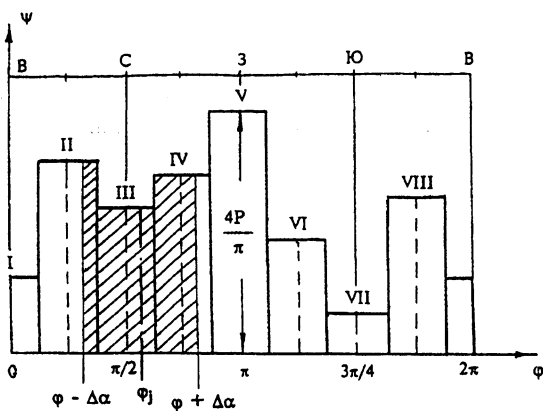


Рисунок 5.4.2. К построению поля токсического поражения

Если при определении поражения в точке (ρ, φ) учесть еще и “субъективные” факторы, т.е. факторы, определяющие присутствие,

жизнедеятельность и поведение человека, характерные для данной точки, в частотном или вероятностном выражении, то можно получить значение уже реального риска.

В заключение следует отметить, что максимальное число расчетов значений $\bar{A}_{n,k,l,a}(\rho_{\eta}, \varphi_{\mu})$ будет равно $N * K * L * 6$ для каждой точки $(\rho_{\eta}, \varphi_{\mu})$. Важно подчеркнуть, что точность вычислений $\bar{A}(\rho_{\eta}, \varphi_{\mu})$ зависит при этом не только от точности численных методов при решении различных краевых задач истечения и рассеяния опасного вещества, но и от степени достоверности, детализации и полноты количественных и частотных характеристик объективных (а при определении реального риска и “субъективных”) факторов.

Представленный алгоритм расчета количественных характеристик поражения людей при аварийном выбросе в наиболее общем виде учитывает влияние определяющих технологических и климатологических факторов, принимающих случайные значения в пределах соответствующих характерных диапазонов изменения.

Как будет показано ниже, в большинстве случаев этот алгоритм может быть упрощен, что позволяет существенно снизить трудоемкость вычислений без сколь-нибудь заметного влияния на точность прогноза.

Рассмотрим более подробно методические особенности построения зоны токсического поражения, вызванного выбросом токсиканта. В зависимости от сценария возникновения и развития аварии, в частности, результирующего направления истечения, а также исходного поля скорости интегрального потока, точка касания шлейфом поверхности земли может находиться либо в непосредственной близости от “источника”, либо отстоять от него на определенное расстояние (на рис. 5.4.3 $x = x_1$). Примем, что за весь рассматриваемый период “времени негативного воздействия” направление и сила ветра, а также градиент температуры по высоте остаются неизменными. Под действием турбулентного переноса газа в атмосфере, начиная от точки касания шлейфа, на поверхности земли будет формироваться некоторый характерный “след” (с граничной концентрацией C_*) с изменяющейся в общем случае во времени геометрией. Пусть на момент времени τ_j этот “след” имеет вид, представленный на рис. 5.4.4. Внутри “следа” имеет место существенная неоднородность по концентрациям токсиканта, а его контур ($C \equiv C_*$) характеризует лишь текущую площадь зоны, в пределах которой возможна реализация ущерба различных степеней

тяжести (от незначительного отклонения от физиологических норм до летального исхода).

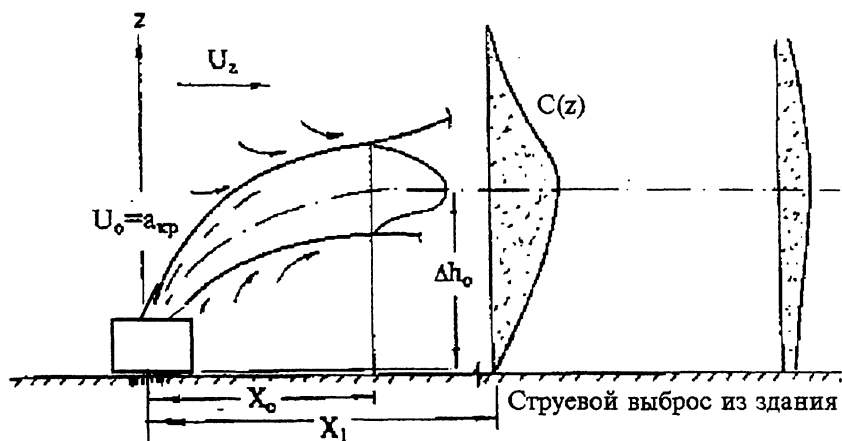


Рисунок 5.4.3. Варианты выброса токсического газа.

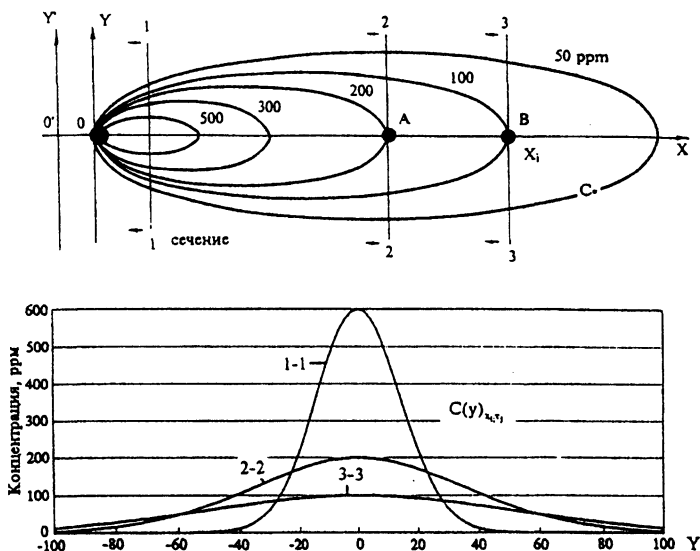


Рисунок 5.4.4. Распределение концентрации $C(x,y)_{ij}$ токсиканта в “следе” шлейфа.

Как было отмечено выше, для эффектов острого токсического поражения крайне важное значение имеет не только общая величина дозовой нагрузки, но и динамика изменения концентрации в конкретной точке. Для рассматриваемого ниже случая выброса токсиканта с постоянным расходом из “наземного” источника рассчитанные функции $C(\tau)$ для двух характерных точек территории (“А” и “В”), оказавшихся на оси движения шлейфа (попавших в зону токсического “следа”), представлены на рис. 5.4.5, а соответствующие значения доз $D(y)_{x_i}$ для периода экспозиции $T_0 = 30$ мин – на рис. 5.4.6А. (Расчеты проведены в данном случае для людей, находящихся на открытом воздухе).

В общем случае токсическая нагрузка должна рассчитываться отдельно для людей, находящихся на открытом воздухе и в служебных или жилых помещениях с различной кратностью естественного или принудительного воздухообмена. Если принять, что попавший внутрь помещения токсичный газ “мгновенно” распределяется по всему объему (V) помещения, а кратность воздухообмена (ω) есть величина постоянная, то изменение

концентрации токсиканта внутри помещения $C_{в}(\tau)$ связано с аналогичным изменением концентрации снаружи помещения $C_{н}(\tau)$, уравнением:

$$\frac{dC_{в}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T} \cdot [C_{н}(\tau) - C_{в}(\tau)] \quad (5.4.16)$$

где: $T=V/\omega$ – характеристическое время воздухообмена.

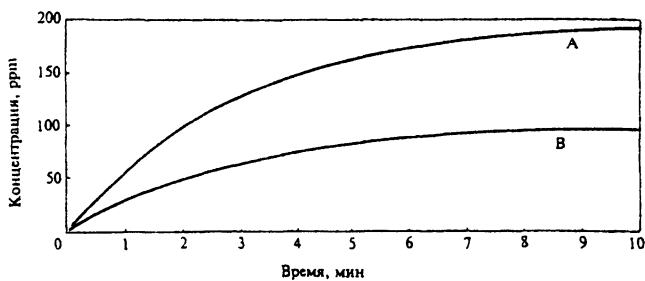


Рисунок 5.4.5. Изменение во времени концентрации в характерных точках на оси "следа".

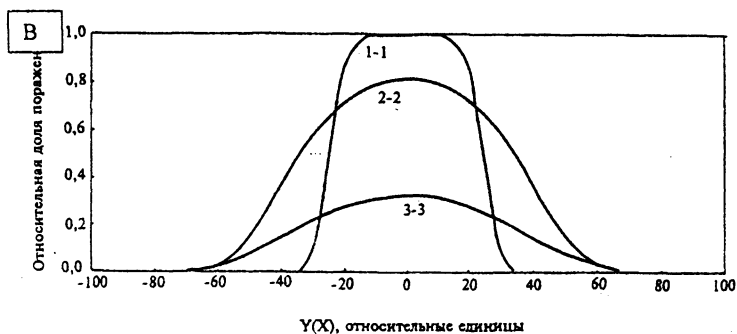
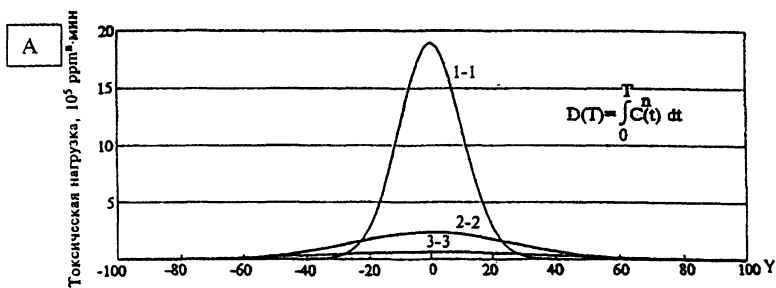


Рисунок 5.4.6. К расчету количественных характеристик токсического поражения (время экспозиции 30 мин).

Данное дифференциальное уравнение может быть решено после подстановки конкретного вида функции $C_n(\tau)$. Практический интерес представляют два возможных варианта изменения вида функции $C_n(\tau)$:

- ◆ концентрация снаружи постоянна;
- ◆ концентрация снаружи распределена по нормальному закону.

Для первого случая при $C_s(\tau)=0$; $C_n(\tau) = \text{const} = C_0$

$$C_s(\tau) = C_0 \times [1 - \exp(-\tau/T)] \text{ при } \tau \rightarrow \infty, C_s \rightarrow C_0 \quad (5.4.17)$$

Аналогичное решение получается в случае, когда в помещении концентрация токсиканта в момент времени $\tau=\tau_0$; $C_n(\tau_0)=C^*_0$, а снаружи равна нулю (обратный “отток”):

$$C_s(\tau) = C^*_0 \times \exp[-(\tau-\tau_0)/T] \quad (5.4.18)$$

В обоих случаях время достижения в помещении половинной от максимально возможной концентрации (τ_2) будет составлять величину:

$$\tau_2 = T \times \ln 2 = 0.69 \times T \quad (5.4.19)$$

Если концентрация снаружи является нормально распределенной по времени, что характерно для распространения облака от мгновенных источников выброса, то, решая эту задачу также как и предыдущую, для максимальной концентрации в помещении получим

$$\bar{N}_{B,\max} = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot U} \cdot (2\pi)^{-1/2} \cdot \frac{1}{T} \quad (5.4.20)$$

где: σ_y, σ_z – коэффициенты поперечной и вертикальной атмосферной дисперсии – м; Q – масса выброса – м^3 ; U – скорость ветра – м/с; c – концентрация токсиканта, в долях единицы.

Обычно принимается, что кратность естественного воздухообмена жилых или административных помещений $\omega \leq 2$. Теоретические основы процессов распространения вредных и токсичных веществ в объеме специально вентилируемых производственных помещений и методы расчета параметров аварийной вентиляции детально изложены в [35].

Рассчитав распределение функции $D(x,y)_T$ и выделив конкретную группу риска, т.е. подобрав для нее числовые коэффициенты пробит-функции, далее можно перейти к определению вероятности (или доли в %) поражения людей (с использованием приведенной выше функции Гаусса) и построить подобную функции $S(x,y)$ распределение функции $A(P_R)$ в пределах исходно выделенной зоны потенциальной опасности. В качестве иллюстрации сказанного на рис. 5.4.6 В построены профили поражения при 30-ти минутной экспозиции для трех характерных сечений (1-1, 2-2 и 3-3, рис. 5.4.4) исходного физического поля концентраций (вернее для определенного набора точек пространства, расположенных на линиях перпендикулярных осевой линии движения облака).

Как следует из этого рисунка, по мере удаления от оси облака относительная доля (или мера) поражения уменьшается для различных (перпендикулярных оси) сечений по различным законам, причем они существенно отличаются друг от друга даже по своим максимальным значениям (на оси "следа"), что крайне затрудняет проведение комплексного анализа риска. Напомним, что, согласно принятой в международной практике терминологии, индивидуальный риск трактуется как вероятность именно гибели человека. В этой связи был предложен [36] методический подход, заключающийся в замене функции распределения относительного поражения (неоднородного по площади "следа") функцией "абсолютного" поражения с однородным распределением (вероятности $P \equiv 1$) в пределах площади. Построение для эквивалентной площади токсического следа $S_{3k}(\tau)$ дает

$$\int_{x_0(\tau)-r(\tau)}^{x_0(\tau)+r(\tau)} \int F(P_R) dYdX = F(1) \int_{S_{3k}(\tau)} dS \quad (5.4.21)$$

Отмеченные положения проиллюстрированы на рис. 48А. Из приведенного анализа следует, что эквивалентная “зона абсолютного токсического поражения” имеет характерный листообразный вид. На рис. 48В представлено влияние возможных изменений в годовом (сезонном) разрезе характеристик атмосферного переноса (скорость ветра, класс устойчивости атмосферы) на потенциальную площадь абсолютного поражения. Как следует из полученных данных, при инверсионных состояниях атмосферы (при положительном градиенте температур) и умеренных скоростях ветра (2,0÷2,5 м/с) площадь возможного поражения резко возрастает.

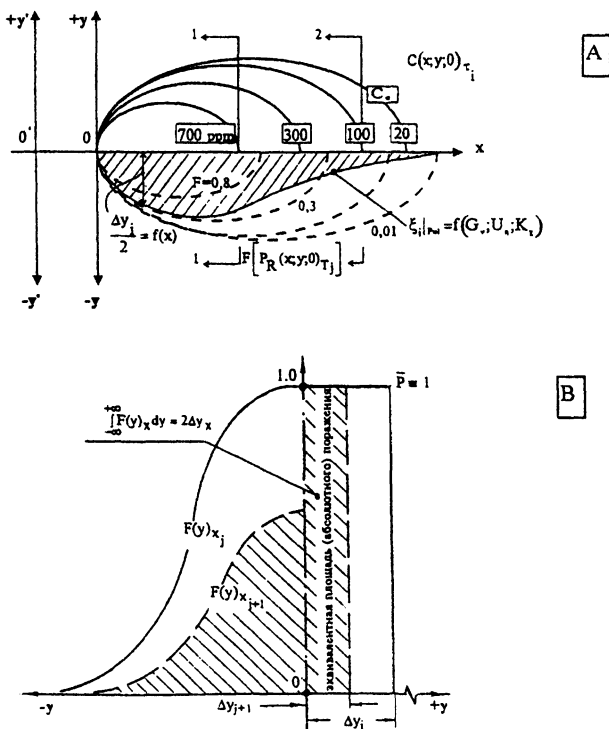


Рисунок 5.4.7. А. Эквивалентирование зоны токсического поражения

Расчет индивидуального риска в некоторой точке территории вокруг источника опасности требует, во-первых, обоснования вероятности попадания выбранной точки в зону воздействия

негативных факторов и, во-вторых, определения вероятности возникновения летального исхода (абсолютного поражения) при характерной интенсивности и общем времени действия негативных факторов на человека (как представителя биологического вида).

Очевидно, что рассмотренная логическая схема расчета характеризует лишь частный случай общего вероятностного спектра изменения как “функции источника” (объем, интенсивность и тип выброса; термодинамические особенности фазовых превращений жидкости; теплофизические свойства и “сезонные” характеристики “подстилающей” поверхности и т.п.), так и функций переноса (географическое направление и сила ветра, состояние устойчивости атмосферы и т.п.) для конкретного технологического объекта. Для проведения полноценного анализа риска очевидна необходимость учета не только отдельных, но полного спектра физически обоснованных сценариев аварий для всех опасных объектов, а также всех возможных функций переноса (в характерном годовом разрезе изменения как самого технологического цикла производства или режимов хранения различных веществ, так и состояния ландшафта и атмосферы). А это однозначно требует перехода к построению полей потенциальной опасности и полей потенциального ущерба (риска).

Как было отмечено выше, появление конкретной зоны потенциальной опасности $Z_i(x,y)$ (с характерным граничным контуром $C = C_*$), в пределах которой (при $C > C_*$) имеется ненулевая вероятность ущерба, является сложным событием (принцип “если-то”) и его вероятность определяется через произведение условных вероятностей формирующих его независимых событий, т.е.

$$P(Z_i)_n = P(G_k) [P(U_r) \cdot P_a] \quad (5.4.22)$$

Расчеты должны проводиться при этом отдельно для каждой из выделенных временных градаций ($n=1, \dots, N$) в разрезе года ввиду, как правило, существенного влияния “сезонных особенностей” как на функцию источника ($G_k; P(G_k)$) так и на характер атмосферного переноса.

Зоны абсолютного поражения (ξ_i) при этом полностью подобны и определяются теми же закономерностями, что и исходные зоны физических параметров (Z_i).

Как следует из приведенной формулы одним из основных факторов влияния на масштабы негативного воздействия является

интенсивность (общий объем) поступления (выброса) токсичного вещества в атмосферу. Этот параметр должен определяться по результатам специального анализа технологической специфики объекта. Итог такого анализа целесообразно представить в виде некоторой функции распределения – $\bar{P}(G)$, характеризующей долю повторяемости определенных аварийных расходов (масс) в разрезе года (сезона) или любого иного интервала времени, взятого за основу, по которой будут увязаны между собой все остальные характеристики развития конкретных сценариев аварий. При этом минимальное из принятых к рассмотрению значений функции источника – G_{\min} определяет по существу границу целесообразности применения методологии риска как количественной меры потенциальной опасности. Следует отметить, что зарубежными исследователями [37] обращается также внимание и на характер функции $\bar{P}(G)$.

Предположим для примера, что при построении этого распределения выделено пять характерных значений расхода. Пусть в результате выброса (с условно единичной вероятностью) и последующего переноса потенциально опасного вещества с расходом G_1 в т. “А” возникает вероятность поражения P_{11} . Аналогично для варианта выброса с расходом $G_2 - P_{12}$, с расходом $G_3 - P_{13}$ и так далее. Тогда при взаимной независимости величин G_j средневесовая величина вероятности поражения в рассматриваемой точке будет равна

$$P_{\Sigma}^A = \varphi_1 P_{11} + \varphi_2 P_{12} + \dots + \varphi_n P_{1n} \quad (5.4.23)$$

При этом сумма долей всех рассмотренных расходов $\sum \varphi_i = 1$.

Перейдем к особенностям построения поля риска. При этом с самого начала будем иметь в виду индивидуальный риск, т.е. вероятность гибели людей, а следовательно будем оперировать только приведенными зонами абсолютного поражения (см. выше). Для случая токсического воздействия на рис. 5.4.7 А показана зона абсолютного поражения – ξ_i , полученная для конкретного сочетания расхода токсиканта, скорости ветра, класса устойчивости атмосферы и ряда других необходимых для расчета характеристик.

Зоны поражения будут менять свое географическое направление, т.е. находиться в пределах определенного сектора (румба), строго по тому же вероятностному закону, что и

соответствующая градация скорости ветра, а, следовательно, и функция $\Psi(\varphi)$. В соответствии с базовыми теоремами [38] вероятность появления конкретного значения случайной величины $\varphi = \varphi_0$ равна нулю – $P(\varphi_0) = 0$. При этом можно определить только вероятность того, что случайная величина либо примет любое из значений для $\varphi < \bar{\varphi}$, либо будет принимать какое-либо из значений диапазона изменения $\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$. Любая точка с полярными координатами $M(\rho, \varphi)$ на территории вокруг источника опасности будет иметь ненулевую вероятность поражения только если окажется на дуге АВ зоны абсолютного поражения ξ_i , что возможно при изменении случайного направления ветра в пределах сектора $[\varphi - \Delta\varphi(\rho); \varphi + \Delta\varphi(\rho)]$. Тогда

$$P_M(\xi_i) = \int_{\varphi - \Delta\varphi}^{\varphi + \Delta\varphi} \Psi_{U_n} \partial\varphi; \rho \leq \rho_{\max}(U_l, G_h, a_i) \quad (5.4.24)$$

Этот интеграл на рис. 43 численно представлен в виде заштрихованной гистограммы.

Из полученных данных следует, что вероятностные характеристики поражения в принципе не могут быть определены только через линейный размер зоны опасности и должны в обязательном порядке учитывать реальную конфигурацию (ширину) зоны поражения, которая в общем случае может существенно изменяться вдоль осевой координаты. В то же время и в действующих отечественных нормативных методиках и в последних научных работах [39-43] для расчета эффектов поражения людей на территориях вокруг источников с выраженной токсической опасностью используется только линейный размер зоны потенциального воздействия. Более того, этот размер определен не с использованием пробит-функций, а по величине критической токсодозы, причем без дифференциации групп риска по чувствительности к воздействию токсиканта. Поскольку вероятность поражения конкретной точки на длине окружности с заданным радиусом воздействия строго математически определена быть не может в существующих методиках, вероятность, а следовательно и площадь поражения определяют сразу для всего румбового сектора с углом (при $N=8$) – $\pi/4$. Более того для относительно малых скоростей ветра ($U \leq 2$ м/с) площадь поражения рекомендуется принимать с использованием уже даже не одного, а двух румбовых секторов, т.е.

для угла $2 \cdot \pi / 4$. Какой-либо дифференциации по влиянию классов устойчивости атмосферы и относительной (по воздуху) плотности токсиканта на конфигурацию зон потенциального ущерба при этом не проводится.

Покажем методическую неправомерность этих положений, принципиально не касаясь пока вопроса о точности расчета и особенностях построения самих зон потенциального ущерба. Будем рассматривать стандартную 8-ми румбовую сетку и два расчетных варианта зон воздействия, полученных для различных сочетаний метеопараметров (см. рис. 5.4.8), имея ввиду только определение вероятности попадания в зону воздействия точек $M_1(\rho_1; \varphi)$ и $M_2(\rho_2; \varphi)$, размещенных на характерной географической оси (СВ) в пределах Π румба. Из вышепредставленных положений следует, что для каждой конкретной точки с линейной координатой ρ_j эта вероятность будет определяться шириной зоны воздействия (“захвата”) на расстоянии ρ_j , т.е. вероятностью нахождения случайной функции направления ветра в соответствующем диапазоне изменения (для точки M_1 – в диапазоне $[\varphi - \Delta\varphi(\rho_1); \varphi + \Delta\varphi(\rho_1)]$). Определение соответствующей вероятности по нормативным положениям предполагает использование в качестве меры ущерба всей длины дуги АВ. Очевидно, что возникающая при этом погрешность в сторону заведомого завышения пропорциональна отношению $(AB/A_1B_1) > 1$ (или отношению соответствующих углов $N \cdot \beta(\rho_j)/\pi$), причем для представленной на рис. 5.4.9 характерной конфигурации зоны воздействия – Z_1 , находящейся в пределах площади только своего румба, погрешность будет возрастать

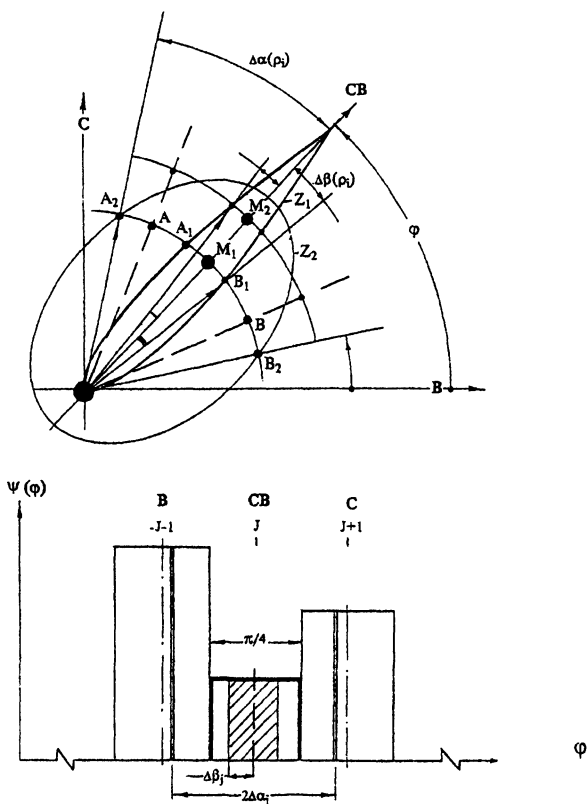


Рисунок 5.4.8. К анализу погрешностей упрощенного определения зоны поражения.

по мере удаления от источника расположенных на оси точек M_j . На графике функции $\Psi(\varphi)$ для каждой из точек M_j вероятность захвата будет характеризоваться соответствующей заштрихованной площадью. Для второго характерного варианта зоны воздействия $-Z_2$, выходящей (на расстоянии $\rho = \rho_1$) по своим размерам за пределы соответствующего румба, вероятность захвата точки $M_1(\rho_1, \varphi)$, определенная с использованием сектора с углом $\pi/4$, будет наоборот занижена, а при использовании двойного сектора ($2 \cdot \pi/4$) – завышена. Из

рис. 5.4.8 следует, что различные точки на оси зоны Z_2 (M_1 или M_2) будут давать погрешность по вероятности захвата как в сторону

завышения, так и в сторону занижения. Наконец, необходимо учитывать также возможность попадания точки М по угловой координате точно на границу секторов, т.е. при углах (при отсчете от восточного направления) $\varphi_j = \pi/8 + (N-1) \pi/4$. При вполне возможной существенной разнице в частоте повторяемости различных градаций скорости ветра в соседних румбах возникнет очевидная неопределенность в трактовке принадлежности к румбам как самих зон воздействия, так и вероятностей захвата этими зонами.

Представленная выше методика дает возможность определить вероятность абсолютного поражения для человека (индивидуальный риск) в любой точке территории вокруг источника опасности с учетом всех влияющих факторов и их комбинаций и далее построить соответствующие замкнутые линии равных вероятностей (рис. 5.4.9) для всего спектра возможных аварий, т.е. построить поля риска.

Построение поля риска позволяет: во-первых, провести на реальной картографической основе дифференциацию индивидуального и коллективного риска как по конкретным направлениям (в пределах выделенных секторов), так и в зависимости от удаленности от источника опасности, а также ранжирование различных групп людей (технического персонала, населения) по уровням риска; во-вторых, обеспечить еще на стадии проектной проработки “рациональное” размещение на генплане источников потенциальной опасности (в общем случае различной природы) и групп риска; в-третьих, оптимизировать защитные мероприятия и системы, направленные на уменьшение вероятности аварии и снижение масштаба выброса (воздействие на “функцию источника” – P_G), в том числе – дифференцированно по отдельным секторам.

Как правило, источниками потенциальной опасности на предприятиях нефтегазового и химико-технологического профиля является не один, а группа технологических объектов или установок, причем зачастую с существенно отличными механизмами и масштабами негативного воздействия на технический персонал и население (см рис. 5.4.10). В предположении, что аварии на этих объектах не могут произойти одновременно, т.е. с точки зрения теории вероятности являются взаимоисключающими событиями, производится наложение полей от каждого из “i” источников с конкретной их привязкой на картографической основе и последующее суммирование соответствующих показателей риска на единичных площадках на всей выделенной для анализа территории.

$$\bar{R}_z(\rho_j; \varphi_j) = \sum_{i=1}^I R_i(\rho_v, \varphi_v) \quad (5.4.25)$$

При этом появляется реальная возможность проранжировать территорию предприятия по числовым показателям интегрального риска и обосновать дифференцированные тарифы социального страхования персонала.

Выделение вкладов каждого из технологических объектов в интегральные показатели риска прежде всего для персонала, неравномерно распределенного в пределах территории самого объекта, а отчасти и для населения прилегающих к предприятию территорий позволяет кроме того наметить приоритеты в управлении риском в том числе акцентировать внимание на объектах с “повышенным” влиянием человеческого фактора. В дополнение к отмеченным положениям в силу взаимной независимости построения полей для каждого из объектов можно получить оценку влияния масштаба характерных аварий на одном объекте на другие. Это представляет особый интерес для сценариев со взрывами и пожарами, поскольку для них весьма вероятно каскадное развитие аварий по принципу «домино»¹, приводящее зачастую к максимальным негативным последствиям.

¹ Эффекты «домино» - возникновение вторичных событий, таких, как токсические выбросы, вызываемых первичным (основным) событием, таким, как взрыв результатом чего является возрастание масштабов последствий или площади зоны воздействия.

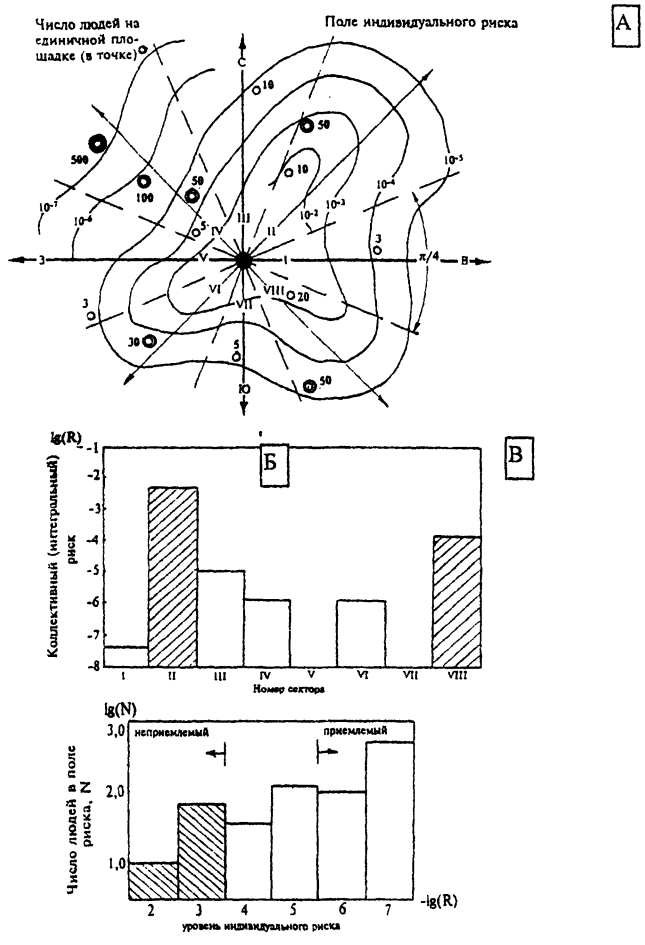


Рисунок 5.4.9. Территориальное распределение потенциального риска вокруг точечного источника опасности (А) и его интегральные характеристики: (Б) – коллективный риск по секторам; (В) – распределение субъектов по уровням риска.

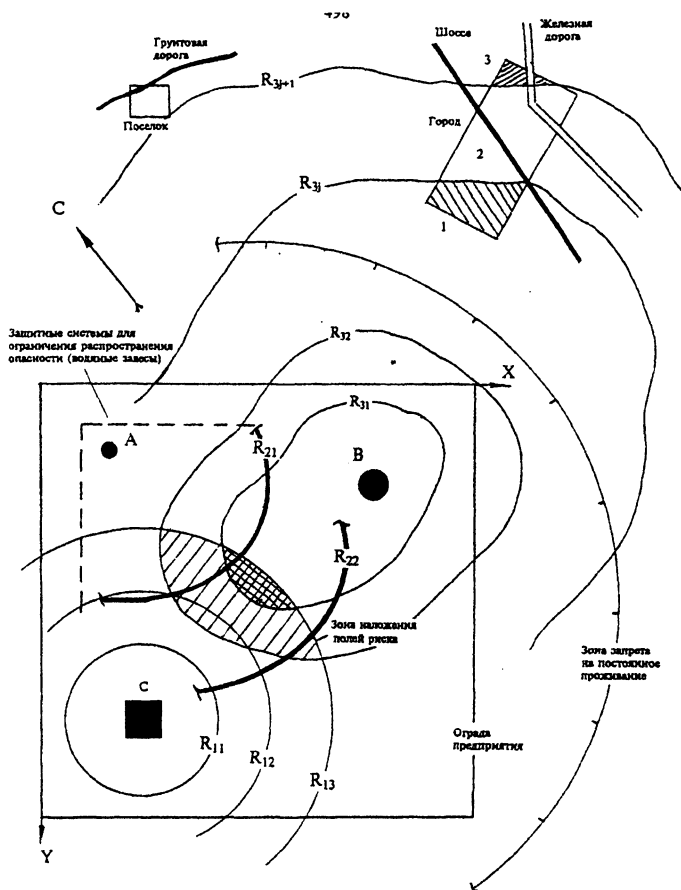


Рисунок 5.4.10. Распределение риска вокруг различных источников опасности (А – горение нефтепродуктов при разливе в обваловании; В – выброс токсичных газов; С – взрыв конденсированных веществ).

Построение поля риска позволяет также провести дифференциацию уровней риска не только по каждому из населенных пунктов в целом, но уже и в пределах конкретного крупного населенного пункта при характерной его ориентации относительно источника опасности (см. рис. 5.4.10), что непосредственно сказывается на достоверности оценок.

Рассмотренные выше особенности касаются, строго говоря, только построения поля потенциального риска, поскольку формально предполагают присутствие человека (как биологического вида) в рассматриваемой точке территории в течение всего анализируемого временного интервала (как правило, года) при абсолютно пассивном отношении к внешней опасности. Учет реальных возможностей человека по избеганию или снижению меры опасности позволяет существенно повысить объективность расчета показателей риска.

Эту проблему целесообразно рассматривать в двух возможных вариантах. Первый, когда избегание, например, токсической опасности для населения обеспечивается действиями региональных спецслужб в результате раннего оповещения на основании “Плана действий при чрезвычайных ситуациях” (ЧС), разработанного для данного предприятия с учетом наиболее характерных (вероятных) сценариев развития аварий, местных метеорологических особенностей атмосферного переноса, реальных возможностей эвакуации (площадь территории, плотность населения, наличие дорог, транспортных средств и т.п.) и оказания экстренной медицинской помощи и ряда других факторов. В качестве примера на рис. 5.4.11 представлена обработка данных по учениям спасательных служб системы гражданской обороны на Астраханском газохимическом комплексе (обеспечивающем добычу и переработку природного газа с содержанием 25% об. H_2S), в виде вероятности “неадекватных” действий населения и спецслужб в зависимости от времени подхода опасности (токсичного облака) к субъекту воздействия [44]. Эту зависимость можно аппроксимировать функцией вида

$$P_3 - P_0 = \exp(-\gamma\tau); \text{ при } \tau \equiv \tau_j = L_i(\varphi) / U_\eta(\varphi), \quad (5.4.26)$$

в которой величина “ P_0 ” учитывает возможность неадекватной реакции определенной части населения; коэффициент эффективности “ γ ” – надежность систем раннего оповещения, развитость транспортной инфраструктуры, численность населения и т.п., а “ τ ” (“подлетное время”) определяет по существу характерную удаленность населенного пункта от источника опасности при заданной скорости ветра.

В силу указанных обстоятельств вероятностная функция избегания $P_3 \sim \rho_j / U_\eta(\varphi)$ должна непосредственно использоваться как коэффициент пропорциональности при расчетах пространственного распределения потенциального поражения в каждой точке, а

следовательно и при расчетах зоны абсолютного поражения – ξ_i . Как показал анализ, конфигурация построенной таким путем зоны абсолютного поражения ξ_i^* будет близка к прежней зоне (ξ_i) в ближней к источнику опасности области (т.е. при ограниченных временных возможностях избегания опасности), однако, будет иметь значительно меньшую ширину (т.е. меньший риск) в “дальней” зоне.

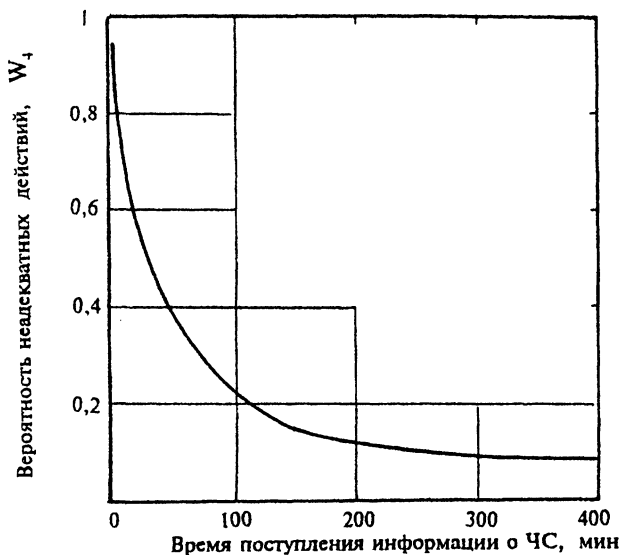


Рисунок 5.4.11. Вероятность неадекватных действий при токсической опасности для населения Астраханского ГКК в условиях применения плана чрезвычайных мероприятий.

В качестве дополнительной иллюстрации этих положений на рис. 5.4.12 представлена диаграмма Агентства США по защите окружающей среды (EPA) [37], характеризующая степень неадекватности действий (спецслужб, населения) при ЧС в функции интервала времени от момента оповещения об опасности для различных значений параметра $\bar{w} = F^{0,33} \cdot \bar{N}^{0,4}$, где F – площадь, на которой должны проводиться соответствующие специальному плану действия (квадратные мили); \bar{N} – плотность населения (количество людей на квадратную милю).

Наиболее эффективным вариантом избегания токсической опасности является постоянное ношение с собой индивидуальных средств защиты (в данном случае противогазов с соответствующим фильтрующим элементом) и необходимая подготовленность к их использованию в экстремальных ситуациях, причем как по сигналам тревожной сигнализации, так и по органолептическому восприятию токсиканта. Ввиду высокой надежности современных индивидуальных средств газовой защиты (вероятность отказа $\sim 0,01$) этот вариант можно рассматривать как наиболее эффективный, однако, очевидно, что реальные возможности его применения ограничены техническим персоналом.

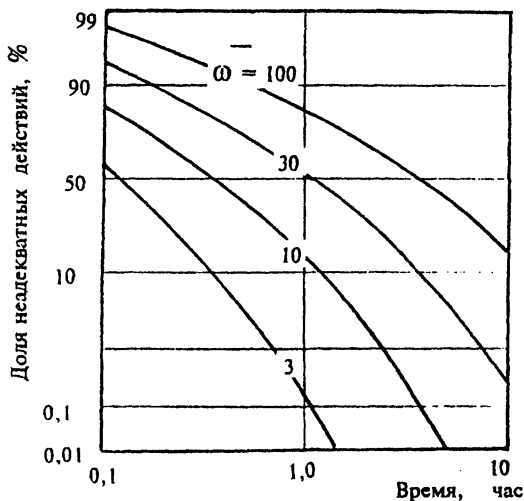


Рисунок 5.4.12. Влияние срабатывания систем раннего оповещения и эффективности действия населения и спецслужб в условиях ЧС на относительные масштабы поражения.

При решении рассматриваемой проблемы возникает ряд объективных трудностей, связанных со следующими обстоятельствами. Во-первых, индивидум (коллектив) зачастую не знает или не в полной мере осознает реальную опасность и поэтому даже не пытается решать какие-либо оптимизационные задачи.

Во-вторых, в ходе своей жизнедеятельности (работы) индивидум (коллектив) оптимизирует и другие критерии, такие как

материальный достаток, возможность заниматься известной ему профессией или любимым делом и т.д. и проводит определенное их сравнение. В-третьих, существующие отечественные системы оповещения об опасности, как правило, далеки от совершенства, т.е. человек узнает об опасности слишком поздно, а система “внешнего” обеспечения адекватных действий при чрезвычайных ситуациях слишком зависима от различного рода ведомственных разногласий и случайных факторов. В-четвертых, только в очень простых случаях “рядовой” человек (не прошедший специальной подготовки) способен в чрезвычайных ситуациях принимать оптимальные решения. Особенно трудно ожидать правильных решений в условиях неопределенности, связанной с вероятностной природой полей риска и недетерминированной реакцией (откликом) индивидуума (коллектива) на то или иное значение опасного фактора.

В силу отмеченных обстоятельств при разработке систем поддержки принятия решений зачастую приходится ориентироваться лишь на граничные характеристики поля риска, т.е. достижение номинальных значений риска при “наихудшем” и “наилучшем” сценариях развития аварии. Следствием такого подхода может стать формулирование территориальных и иных требований на пребывание населения в зоне потенциального негативного воздействия промышленного объекта: буферная зона, в которой должно быть запрещено проживание населения, поскольку даже при оптимальном избегании опасности невозможно достичь приемлемого уровня риска; зона гарантированного риска, в которой даже при наихудшем поведении человека (коллектива) обеспечивается приемлемый уровень риска. Очевидно, что между этими границами может быть введен ряд промежуточных зон (например, зона повышенной опасности; зона плановой эвакуации и т.п.), зависящих от конкретных возможностей действий в чрезвычайных ситуациях.

Возможности избегания поражения для других характерных аварийных воздействий, связанных со взрывами паровых облаков или образованием огневых шаров, как показывает практика, в целом ограничены ввиду выделения весьма значительных количеств тепловой энергии за интервалы времени $0,5 \div 3,0$ с. – для дефлаграционного сгорания облака в технологически загроможденных открытых пространствах и $10 \div 20$ с. для теплового воздействия огневого шара (эффект BLEVE), а также ввиду формирования воздушной ударной волны (при дефлаграционном режиме горения) с амплитудой $0,5 \div 1,0$ бар (без учета эффектов отражения) за период фазы сжатия $0,01 \div 0,2$ с. Однако необходимо

учитывать, что эти процессы являются, как правило, итогом ряда промежуточных событий, где в качестве первичного выступает разгерметизация оборудования. Это обстоятельство, с точки зрения “раннего оповещения”, делает особо значимым контроль за соответствующими теплообменными и гидрогазодинамическими процессами в сосудах, аппаратах и трубопроводах, а также контроль за газовой опасностью в прилегающей зоне.

Как было отмечено выше, одним из наиболее эффективных методов экономического управления промышленной безопасностью за рубежом является обязательное страхование ответственности предприятия перед населением. В ближайшее время ожидается значительный рост активности страховых компаний на рынке страхования промышленных рисков также и в России. Это обусловлено Постановлением Правительства РФ №661 от 01.07.95, разрешающим администрации промышленных предприятий относить страховые платежи на себестоимость выпускаемой продукции (до 1%). К таким платежам отнесены платежи по страхованию: средств транспорта; имущества предприятий; гражданской ответственности предприятий в случаях аварий. Очевидно, что страхование промышленных рисков будет проводиться прежде всего на объектах с повышенной опасностью и может быть основано только на общей методологии промышленного риска. Методическая база промышленного страхования в России в должной мере еще не отработана [45-48]. В то же время можно (в порядке обсуждения) предположить, что основная часть социального страхового тарифа будет определяться с использованием расчетов именно индивидуального риска (т.е. максимального “фонового” уровня опасности), а меньшая – с использованием определенных “льгот”, учитывающих эффективность технических систем и организационных мер по избеганию опасности.

Учет возможностей избегания опасности при анализе показателей риска по существу относится уже к сфере управления показателями риска эксплуатации промышленного объекта для технического персонала и населения. Однако, предварительно необходимо остановиться на выборе базы и методах сравнения рисков различной природы.

Опасность, в принципе, возникает при наличии как некоторого источника воздействия (реального или потенциального), так и объекта (или субъекта), воспринимающего это воздействие. Можно утверждать, что опасность – это некоторое общее свойство системы “источник– объект воздействия”, характеризующее вероятность

определенного вреда или ущерба для объекта, наносимого источником. Комплексный анализ риска предусматривает сравнительную оценку различных источников опасности, связанных с разными видами деятельности человека. Считается, что в “идеальном” варианте уровень приемлемости риска должен соответствовать условию равновесия между риском и пользой от этого вида деятельности. С целым рядом видов деятельности человека связана определенная степень риска вредного воздействия, результатом которого могут быть травма, заболевание определенной этимологии и/или смерть. Применение большинства технологий дает не только некоторую дополнительную пользу для общества, но и определенное увеличение уровня риска неблагоприятных последствий для (здоровья) населения.

Социальные аспекты этой проблемы проявляются в неравномерности распределения пользы и вреда между различными социальными группами общества от деятельности потенциально опасного объекта. Преимущества от применения технологии концентрируются зачастую у одних членов общества, а риск неблагоприятных последствий, связанных с ее недостатками, распределяется на других или на общество в целом.

Психологические аспекты проблемы приемлемого риска очень сложны и еще пока мало изучены. Каждый человек имеет свою собственную, основанную на индивидуальном жизненном опыте систему оценки риска разных неблагоприятных последствий, связанных с его участием в различных сферах деятельности. Это особенно проявляется в тех сферах деятельности человека, в которых он принимает участие на добровольной основе (добровольный риск). Остальные виды деятельности человека включают случаи, когда отдельные лица из населения или население в целом подвергаются вынужденному риску. Известно, что отдельные лица склонны принимать добровольный риск, уровень которого в 1000 раз выше, чем в случае вынужденного риска.

Хотя в настоящее время можно считать общепризнанным тот факт, что абсолютная безопасность не может быть достигнута, однако психологическое восприятие концепции приемлемого риска оказывается затрудненным. Отчасти это связано со спекуляциями и преувеличениями статистических данных, используемых при анализе, неоднозначной или неудачной терминологией, применяемой при рассмотрении проблемы приемлемого риска.

Ниже в таблицах 5.4.3-5.4.8 представлены сводные зарубежные данные [49-52] по показателям различных видов риска для людей,

связанного как с естественной средой обитания и профессиональной деятельностью, так и стихийными бедствиями.

Таблица 5.4.3

Ориентировочная шкала приемлемости индивидуального риска смерти (на человека в год)

Уровень риска	Оценка приемлемости риска
$>10^{-2}$	Исключительно высокий уровень риска смерти.
$10^{-3} - 10^{-2}$	Очень высокий уровень риска.
$10^{-4} - 10^{-3}$	Высокий уровень риска.
$< 10^{-4}$	Относительно невысокий уровень риска.
Граница приемлемости	
$< 10^{-5}$	Невысокий и малый уровень риска.

Таблица 5.4.4

Ориентировочная шкала приемлемости риска смерти за период профессиональной деятельности

Уровень риска	Оценка приемлемости риска
$>10^{-1}$	Исключительно высокий уровень риска.
$10^{-2} - 10^{-1}$	Относительно высокий уровень риска.
$<10^{-2}$	Невысокий уровень риска.
Граница приемлемости	

Таблица 5.4.5

Риск смерти при естественных катастрофах (на человека в год)

Вид события	Риск смерти	Вид события	Риск смерти
Наводнения, цунами	4×10^{-6}	Грозы	6×10^{-7}
Землетрясения	3×10^{-6}	Ураганы, торнадо	3×10^{-8}
Тайфуны, циклоны, бури	2×10^{-6}	Все виды событий	1×10^{-5}

Таблица 5.4.6

Риск смерти при воздействии искусственной среды обитания (на человека в год)

Вид воздействия	Риск смерти	Примечание
Катастрофы в искусственной среде обитания	$10^{-6} - 10^{-5}$	Смог, аварийное загрязнение внешней среды и т.п.
Выбросы теплоэлектростанций	$4 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$	Загрязнение атмосферы
Выхлопные газы автомобилей	$(1-5) \times 10^{-6}$	В промышленно-развитых странах
Выбросы и отходы атомных	$5 \times 10^{-8} - 3 \times 10^{-7}$	При дозе 1-5 мбэр в год на

электростанций (АЭС)	7	границе зоны АЭС
Медицинские процедуры с применением излучений	5×10^{-6}	При годовой популяционной дозе $1,5 \times 10^{-7}$ человеко-бэр
Прочие воздействия ионизирующей радиации на население	$(1-2) \times 10^{-7}$	Радиоактивные вещества в товарах широкого потребления, излучение телевизоров, при полетах обычных и сверхвысотных самолетов
Все виды воздействия искусственных источников ионизирующей радиации	$(3-6) \times 10^{-6}$	Исключая профессиональное облучение

Таблица 5.4.7

Риск смерти от несчастных случаев в транспортных условиях (на человека в год)

Причины смерти по перечню ВОЗ	Возрастные группы:			
	15-24	25-34	35-44	45-54
Несчастные случаи, связанные с автотранспортом	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Несчастные случаи на обществ. путях сообщения, связанные с другими средствами передвижения	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Несчастные случаи на железнодорожном транспорте	$0,6 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Несчастные случаи на водном транспорте	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Несчастные случаи на воздушном транспорте	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$

Таблица 5.4.8

Риск смерти для ряда промышленных профессий (на человека в год)

Профессия	Англия	США
Экипажи рыболовных траулеров	$2,7 \cdot 10^{-3}$	—
Рабочие угольных шахт	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$ включая шахты и карьеры)
Рабочие гончарного и керамического производства	$5,0 \cdot 10^{-4}$	—
Строительные рабочие	$1,9 \cdot 10^{-3}$	—
Рабочие обрабатывающей промышленности в целом	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Рабочие всей промышленности	—	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Рабочие предприятий атомной промышленности США (нерадикационный риск)	—	$8,0 \cdot 10^{-4}$

Вопрос об уровне приемлемого риска является весьма важным в принятии решений. Следует подчеркнуть, что выбор значения приемлемого уровня индивидуального риска во многом зависит от экономического состояния страны. Так в Нидерландах в 1985 г. концепция "приемлемого риска" была принята в качестве государственного закона [53]. По этому закону от опасностей, связанных с техносферой, недопустимой для населения считается вероятность смерти в год более 10^{-6} , приемлемой – менее 10^{-8} . Решение по объектам, уровень индивидуального риска которых лежит в интервале $10^{-6}..10^{-8}$, принимается исходя из конкретных экономических и социальных аспектов. В других странах масштабы использования концепции "приемлемого риска" в законодательстве более ограничены, чем в Нидерландах, однако практически во всех промышленно развитых странах уже существует и действует четкое понимание необходимости более полного применения методологии, как одного из наиболее эффективных механизмов управления промышленной безопасностью (см. таблицу 5.4.9).

Таблица 5.4.9

Критерии риска, принятые или предлагаемые в практической деятельности различными национальными организациями

Год	Консультативный орган/правительство	Уровень риска в год	Комментарии
1976	Комитет советников по основным опасностям (АСМН), Великобритания	10^{-4}	Максимально допустимая частота серьезной аварии (событие/год) на промышленном предприятии
1976	Королевская Комиссия по загрязнению окружающей среды (РСЕР), Великобритания	10^{-5} Менее 10^{-6}	Обязательное предупреждение об опасности по поводу уровня индивидуального риска (вероятности смерти в год). Уровень индивидуального риска считается приемлемым
1981	Управление по охране здоровья и безопасности (HSE), Великобритания	От $20 \cdot 10^{-6}$ до $400 \cdot 10^{-6}$	Остановка работ не рассматривается как обязательная
1983	Экспертная группа Королевского Общества, Великобритания	Менее $1 \cdot 10^{-6}$; От $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$	Уровень индивидуального риска приемлем. Уровень индивидуального риска неприемлем
1989	Управление по охране здоровья и безопасности (HSE), Великобритания	Менее 10^{-6} От $0,3 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-6}$	Уровень индивидуального риска приемлем. Уровень индивидуального риска из данного диапазона на территориях активного землепользования (местах проживания населения, коммерческой деятельности и т.д.) считается неприемлемым.
1989	Голландский национальный план в	$1 \cdot 10^{-6}$	Максимально допустимый уровень индивидуального риска.

	<p>области политики об окружающей среде (Министерство жилищного строительства, планирования окружающей среды)</p>	<p>$1 \cdot 10^{-8}$</p> <p>От $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-8}$</p> <p>10^{-5} событий в год для более 10 смертей на событие,</p> <p>10^{-7} событий в год для более 100 смертей на событие;</p> <p>10^{-7} событий в год для более 10 смертей на событие,</p> <p>10^{-9} событий в год для более 100 смертей на событие;</p>	<p>Пренебрежимый уровень индивидуального риска.</p> <p>Требуется снижение уровня индивидуального риска.</p> <p>Максимально допустимый уровень социального риска.</p> <p>Пренебрежимый уровень социального риска</p>
1990	<p>Министерство планирования (NSW), Австралия</p>	<p>Менее $1 \cdot 10^{-6}$</p> <p>Менее $0,5 \cdot 10^{-6}$</p>	<p>Уровень индивидуального риска приемлем.</p> <p>Приемлемый уровень индивидуального риска на территориях активного землепользования (местах проживания населения, коммерческой деятельности и т.д.).</p> <p>Установлены дополнительные критерии на случаи ущерба здоровью, которые не приводят к смертельному исходу (ранения и т.д.).</p>

С целью обоснования границ "приемлемого риска" приведем также результаты исследования И.Б.Евстафьева, выполненного по государственной программе уничтожения химического оружия для условий Российской Федерации [50] за период 1987÷1991 гг.

Таблица 5.4.10

Событие	Вероятность смерти в год (индивидуальный риск)
Смерть от неестественных причин	
– в бывшем СССР (1987 г.)	1.1×10^{-3}
– Российская Федерация (1987 г.)	$1.0 \text{--} 1.7 \times 10^{-3}$
Гибель в происшествиях с подвижным составом (1988 г.)	1.6×10^{-4}
Убийство или самоубийство	
– в бывшем СССР (1991 г.)	1.6×10^{-4}
– Российская Федерация (1991 г.)	2.6×10^{-4}
Риск в дорожно-транспортных происшествиях в Московской обл. (1991г)	2.7×10^{-4}
Риск гибели в результате умышленного убийства в Московской обл. (1991 г.)	7.0×10^{-5}
Верхняя оценка поражения персонала техногенных объектов	1.9×10^{-5}
Верхняя оценка гибели населения в результате природного чрезвычайного события (1989 г.)	1.2×10^{-6}
Верхняя оценка гибели населения в результате техногенного чрезвычайного события (1989 г.)	2.4×10^{-6}
Гибель в авиационной катастрофе при полетах на самолетах Аэрофлота	8.0×10^{-7}

Анализ материалов этой таблицы показывает, что для территории Российской Федерации уровень риска (смерть от неестественных причин) близок к 10^{-3} , что на 3÷5 порядков выше установленного на Западе нормативного уровня. Однозначно, что ориентироваться на фоновый уровень, близкий к 10^{-3} , не следует. Характерно, что в ряде конкретных районов этот уровень еще выше. В то же время верхняя оценка фонового уровня гибели населения вследствие техногенных чрезвычайных событий составляет от 2×10^{-5} (1989 г.) до 5×10^{-6} (1990 г.). Исходя из этих данных, следует, что риск гибели населения выше $\sim 5 \times 10^{-5}$ должен рассматриваться как неприемлемый. Отметим, что в ряде отечественных ГОСТов по пожарной опасности в качестве приемлемого уровня как для персонала, так и населения заложен уровень 1×10^{-6} . Видимо, этот показатель более характерен для Запада, чем для условий нашей страны. Анализ всех приведенных материалов показывает, что для территории нашей страны фоновый уровень риска фактически близок к значению 5×10^{-6} .

При разработке проектов, потенциально опасных для населения, показатели риска целесообразно сравнивать именно с минимальным уровнем фонового риска, поскольку недопустимо создавать какой-либо объект лишь на том основании, что его уровень ниже уже существующего регионального.

Проводя сравнение рисков, связанных с промышленной деятельностью и с повседневными бытовыми рисками следует учитывать, что одни опасности принимаются обществом добровольно (например, езда на автомобиле), а другие нет. Весьма важно, что вопрос о восприятии риска существенно зависит от тех реальных выгод, которые дает та или иная деятельность. В качестве иллюстрации на рис. 5.4.13 представлены зарубежные характеристики восприятия людьми различных рисков в системе "затраты-выгоды".

В зарубежной практике для проведения сравнительного анализа уровней социальной опасности различных промышленных объектов широко используются [54,55] так называемые "F-N диаграммы" (см. рис. 5.4.13), полученные по результатам обработки статистики и экспертных оценок и характеризующие по своей сути масштаб негативного потенциала объекта. Очевидно, что чем интенсивней

уменьшается функция $F(N)$, тем меньшую социальную опасность представляет объект. Как показал специально проведенный анализ, для типовых объектов газопереработки и нефтехимии функция $F(N)$ может быть аппроксимирована линейной зависимостью

$$\ln(F) \cong F_0 - \ln(N) \quad (5.4.27)$$

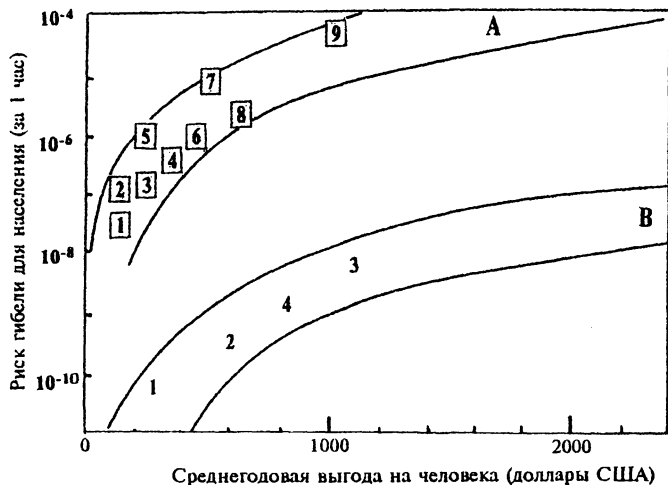
Если принять, что плотность распределения людей в окрестности источника опасности является величиной постоянной, то значимость того или иного сценария развития аварии можно в первом приближении оценивать площадью зоны абсолютного поражения, которая определяется из рассчитанных ранее полей потенциальной опасности:

$$S_{лф} = \int_S R_i(x,y) dS \quad (5.4.28)$$

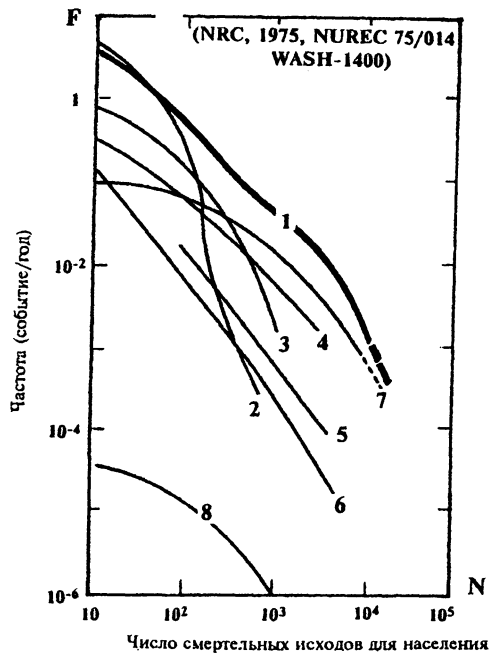
Поскольку $S_{лф} \sim N$, т.е. числу пострадавших, эта величина может использоваться в оценке относительного экономического ущерба от аварий и сравнении вклада различных сценариев аварий.

Любой алгоритм оценки риска должен исходить из того, что твердо установлен экономический эквивалент угрозы безопасности людей и окружающей среды. Необходимо воспрепятствовать тому, чтобы, с одной стороны, ценой больших затрат был уменьшен и без того незначительный риск, а с другой – чтобы оставался большой риск, который можно было бы устранить с небольшими затратами.

А- "добровольный" риск (занятия активной деятельностью):
 1 - железнодорожный проезд (перевозки); 2 - год контрактной службы в армии; 3 - курение; 4 - охота, горные лыжи; 5 - езда на автомобиле; 6 - заболевания; 7 - участие в боевых действиях (Вьетнам); 8 - коммерческая авиация; 9 - авиация общего назначения;



В- "недобровольный" риск (экспозиция внешней опасности)
 1 - природные катастрофы; 2 - морской терминал СПГ в США (Los Angeles); 3 - морской терминал СПГ в Нидерландах (River Mass); 4 - ЛЭП высокого напряжения



1 - в целом по США; 2 - авиакатастрофы в целом; 3 - пожары; 4 - взрывы; 5 - прорывы дамб (плотин); 6 - от падения летательных аппаратов; 7 - перевозки хлора; 8 - 100 шт. АЭС

Рисунок 5.4.13. Различные варианты сравнения рисков: а- система "затраты-выгода"; б - FN-диаграмма

5.5. Пути снижения аварийного риска

Снижение риска может идти по нескольким направлениям:

1. Снижение вероятности возникновения аварии.

Этот фактор определяется прежде всего надежностью технологического оборудования, возможностью контроля и поддержания его ресурса, эффективностью управления технологическим процессом, а также исключением (ограничением) прямого воздействия “человеческого фактора”.

При этом крайне важным является исследование закономерностей возникновения крупномасштабных аварийных отказов из первичных отказов отдельных элементов системы с учетом конкретной технологической специфики объекта. В мировой практике для этой цели, как правило, используются методики построения “деревьев отказов” и соответствующие программные комплексы, позволяющие исследовать неоднозначное влияние различных факторов (физико-химические характеристики материалов, технологии, системы контроля и управления, человеческий фактор и т.п.) на объективные предпосылки и частоту возникновения аварий различных типов. Построение указанных логических схем позволяет также определить наиболее эффективные технические средства и методы либо полного блокирования отдельных “цепочек” возникновения аварий, либо уменьшения их вклада в интегральное значение вероятности аварии. В качестве характерных примеров при этом можно указать на установку на аппаратах независимых дублирующих систем контроля и аварийной сигнализации, предохранительных систем сброса давления и т.п.

2. Уменьшение масштабов и (или) направлений распространения физических полей воздействия от аварии в окружающем пространстве.

Как показывает практика, эффективность этих действий в значительной мере зависит от правильного понимания и возможностей достоверного прогноза физических эффектов, связанных с авариями, а также сценариев их развития и масштабов воздействия на окружающую среду. Уровень материальных затрат на снижение масштабов распространения полей физического воздействия на окружающую среду должен в обязательном порядке увязываться по своей мере значимости с общей стратегией уменьшения риска для рассматриваемой группы воздействия. Характерными примерами при этом является использование

дренажных систем, защитных ограждений и водяных завес в резервуарных парках для сжиженных углеводородов и т.п.

3. Уменьшение масштабов поражения ($S_{\text{пф}}$).

В первую очередь речь идет о поражении людей (технического персонала и населения). При этом важным являются следующие основные моменты: во-первых, правильное понимание специфики поражающих факторов в конкретной аварийной ситуации; во-вторых, соответствующая подготовленность персонала и населения к адекватным действиям в условиях чрезвычайных ситуаций, наличие индивидуальных средств защиты или укрытий при работе в зонах потенциальной опасности; в-третьих, по крайней мере частичное изменение общего эффекта поражения, например, за счет готовности оказать экстренную медицинскую помощь пострадавшим.

4. Наконец, одним из часто применяемых в отечественной практике направлений снижения риска является выведение субъекта воздействия из зоны негативного влияния, т.е. его перемещение относительно опасного объекта на безопасное расстояние. Самостоятельно (по крайней мере на стадии проектирования) может рассматриваться задача об оптимальном пространственно-временном положении групп субъектов и объектов из условий минимизации интегрального риска системы в целом.

Таким образом, повышение безопасности химико-технологических объектов предусматривает в первую очередь осуществление технических и организационных мер, включающих мониторинг опасного объекта, разработку планов ликвидации аварий и плана действий в чрезвычайных ситуациях на территории объекта и за его пределами. Любой технологический процесс должен ориентироваться на технологии, позволяющие максимально снизить вероятность аварий и уменьшить выход опасных веществ во внешнюю среду, при этом необходимо учитывать, что рациональное размещение объектов также позволяет обеспечивать безопасность людей и окружающей среды.

Литература к разделу 5

1. Доброчеев О.В. Рассеяние тяжелых газов в атмосфере. Физический механизм. Математические модели. М.: РНЦ “Курчатовский институт”, 1993. 112 с.
2. Едигаров А.С. Метод расчета зоны поражения при аварийных выбросах токсичного газа. – Российский химический журнал, 1995, т. 39, № 2, с.94-100.
3. Едигаров А.С. Численный анализ различных моделей турбулентного переноса в задаче диффузии тяжелого газа. – Инженерно-физический журнал, 1991, т.61, № 3, с.501-503.
4. Едигаров А.С. Численный расчет турбулентного течения холодного тяжелого газа в атмосфере. – Ж. вычисл. математики и мат. физики, 1991, т.31, №.9, с.1369-1380.
5. Детков С.П., Детков В.П., Астахов В.А. Охрана природы нефтегазовых районов, М.: Недра, 1994,335с.
6. Ley B., Bloxam R., Misra P. Atmospheric Model Development Unit Air Quality and Meteorology. – Section Air Resources Branch, 1986, 170 p.
7. McNaughton D.J. Errors Inherent in Wind Inputs to Unliked Source and Dispersion Models. – J. Air Waste Manage. Assoc., No. 7, p. 1018-1020.
8. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Л.: Гидрометеиздат, 1991, 278 с.
9. Аверин Л.В., Кондрашков Ю.А., Щевяков Г.Г. Исследование процесса перемешивания на участке взаимодействия струи с поперечным сносящим потоком. –Инженерно-физический журнал. 1985. т.X IX. № 5, с.751-756.
10. Аверин А.В., Кондрашков Ю.А., Томилин В.П., Щевяков Г.Г. Обеспечение безопасности при дренажных выбросах газообразного водорода в атмосферу.-В сб.: “Вопросы атомной науки и техники”, ЦНИИАтоминформ, М., 1984, вып.3, с.40-42
11. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы –Л., Гидрометеиздат, 1975

12. Томилин В.П., Щевяков.Г.Г., Кондрашков Ю.А. Определение размеров зон опасных концентраций и температур при выбросах паров сжиженных газов. –Химическое и нефтяное машиностроение.,1986, № 1, с.25-26.
13. Щевяков Г.Г., Томилин В.П., Кондрашков Ю.А. Влияние архимедовой силы на длину зоны смещения свободной турбулентной струи. –Инженерно-физический журнал, т.Х., № 3, с. 533-534.
14. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. –М., “Машиностроение”, 1960, 400 с.
15. Ливанов Ю.В. Построение дерева исходов для анализа аварий и катастроф с использованием ПЭВМ. –Техническая кибернетика. 1990. №6, с.178-184.
16. Methods for Calculation of Physical Effects of the Escape of Dangerous Materials (Yellow Book). Part II.Report of the Committee for the Prevention of Disasters. TNO. 1979.
17. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. -М., “ Физматгизд”. 1960, 716 с.
18. Камотани А. Экспериментальное исследование турбулентной струи вдуваемой в сносящий поток. – Ракетная техника и космонавтика., 1972, № 11, с.43-49.
19. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. (Под редакцией Ф.Е. Ньистадта и Х.Ван Дона). Л.: Гидрометеониздат. 1985, 352 с.
20. A Model to Estimate Ground – Level H₂S and SO₂ Concentrations from Uncontrolled Sour Gas Releases. Report Concord Scientific Corporation, 1988.
21. Адушкин В.В., Когарко С.М., Лямин А.Г. Расчет безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере. – Взрывное дело. № 75/ 32. М.: Недра. 1975, с. 82-94.
22. Башкирцев М.П. Основы пожарной теплофизики. – М., Стройиздат 1971, 182 с.
23. Белик Н.П., Беляев Н.М., Шандров Г.С. Расчет процесса опорожнения газовой емкости. – Инженерно-физический журнал, 1964, VII, № 9, с. 25-28.
24. Анализ показателей безопасности и риска эксплуатации завода сжижения природного газа и морского терминала Харасавэй. (ТЭО целесообразности освоения Харасавэйского

газоконденсатного месторождения путем строительства завода сжижения и вывоза СПГ танкерами. Книга VI – РАО “ГАЗПРОМ” М., 1995)

25. Андронов Л.П. Перевозка опасных грузов морем. – М., Транспорт. 1971, 208 с.
26. Одишария Г.Э., Сафонов В.С. Тепловые процессы в низкотемпературных трубопроводах. – Известия АН СССР, Сер.: “Энергетика и транспорт”, 1981, № 6, с. 115-123.
27. Проценко А.Н., Сегаль М.Д., Кузьмин И.И. Руководство по анализу и управлению риском в промышленном регионе.– М., ВИНТИ. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1993. вып. 9, с.17-26.
28. Руководство по классификации и приоритизации риска от крупных аварий в технологических процессах и связанных с ним промышленных производствах.– М., МАГАТЭ, 1993.
29. Попов А.П., Каприелов К.Л. Анализ причин отказов в процессе обустройства и длительной эксплуатации газодобывающих предприятий Крайнего Севера – В сб.: Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. ИРЦ «ГАЗПРОМ». №11. 1995, с. 14-20.
30. Мищуев А.П. Отражение гидравлического бора от вертикальной стенки.– Гидротехническое строительство. 1982. № 4, с.28-30.
31. Нигматуллин Р.П. Динамика многофазных сред. М.: наука, 1987, т. 1, 464 с.
32. Одишария Г.Э., Сафонов В.С., Овчаров С.В., Швыряев А.А. Оценка риска эксплуатации газотранспортной системы “ Ямал-Центр”. – В сб.: “ Социальные, техногенные и природные факторы риска в производственной деятельности” (Материалы семинара “ Риск и страхование”, сентябрь 1994 г.,
33. Провести расчеты аварийных ситуаций на изотермическом хранилище. – Отчет о НИР/ВНИИПО (Макеев В.И., Некрасов В.П., Федоров А.П.) – С-6.1. Н.003.90 “ Резервуар”, М., 1990, 64 с.
34. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М., Химия. 1981, 272 с.
35. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. М., Химия. 1980, 288 с.

36. Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности Утв. РАО "Газпром" 19.03.96. – М.: Геликон, 1996, 208 с.
37. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. – New-York: AIChE/CCPS, 1989.
38. Гнеденко Б.В., Хинчин А.Е. Элементарное введение в теорию вероятности. М., Наука, 1976
39. Временная методика расчета рассеивания газовых выбросов из наземных источников на объектах газовой промышленности: Утв. Мингазпромом СССР 31.08.87 М., ВНИИГАЗ, 1987, 42 с.
40. Лимар Е.Е. Методология расчета риска при авариях на газотранспортных системах. – В сб.: Основные направления в решении проблемы экологического риска топливно-энергетического комплекса. М., ВНИИГАЗ. 1994, с. 156-163.
41. Максимов В.М., Лимар Е.Е. Новый подход к оценке экологических последствий аварий на газопроводах. – Газовая промышленность, 1992, №10, с. 22-24.
42. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте.(РД 52.04.253-90): Утв. Госкомгидрометом СССР 24.03.90. Л., 1991, 23 с.
43. Методические указания по расчету параметров выброса газовой смеси и ее рассеивания в атмосфере при аварийных разрывах газопроводов. – М., ГАНГ им. И.М.Губкина, ВНИИГАЗ, 1992, 64 с.
44. Оценка риска воздействия Астраханского газоконденсатного комплекса на окружающую среду и здоровье человека. РАО "ГАЗПРОМ" М., 1994 г.
45. Бурдаков Н.И., Елохин А.Н. Страхование при чрезвычайных ситуациях в России: проблемы и перспективы. -М., ВИНТИ. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1993., вып. 8, с.65-73.
46. Елохин А.Н. Учебно-практический семинар "Страхование и уменьшение риска природных и промышленных катастроф. – М.,

- ВИНИТИ. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях., 1995г., вып. 12, с. 68-71.
47. Елохин А.Н., Черноплеков А.Н. Страхование промышленных рисков в России. – М., ВИНИТИ. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях., 1996г., вып. 2, с. 12-17.
 48. Коломин Е.А. Страховой рынок России: итоги и перспективы. – Финансовая газета. Региональный выпуск. 1995г., № 17-18
 49. Воробьев Е.Е., Ковалев Е.Е. Радиационная безопасность экипажей летательных аппаратов. – М., Атомэнергоиздат, 1983, 151 с.
 50. Евстафьев И.Б., Григорьев С.Г. К вопросу об оценке фонового уровня риска. -М., ВИНИТИ. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях., 1993, вып. 3, с. 2-15.
 51. Ковалев Е.Е. Радиационный риск на Земле и в космосе. – М., Атомиздат, 1976.
 52. Ковалев Е.Е. Радиационная безопасность экипажей космических аппаратов.-В кн.: “Защита от ионизирующих излучений”, М., Атомэнергоиздат. т.2, 1990
 53. Управление риском в социально-экономических системах: концепция и методы ее реализации. – М., ВИНИТИ, Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 1995, № 11, с. 3-35; 1996, № 2, с. 18-71.
 54. Fay J. Risk of LNG and LPG. – “ Ann. Rev. Energy”, 1980, № 5, p. 89-105.
 55. Handman S. Pros and cons of LNG safety. – “ Pipeline industry”, Ser. 1979. 51. №32 pp. 39-42

Вопросы и задачи к разделу 5

1. Понятие потенциальный территориальный риск.
2. Факторы, определяющие размеры зоны токсической опасности при выбросах загрязнений в атмосферу.
3. Алгоритм расчета риска для здоровья населения при выбросе токсикантов.
4. Каскадное развитие аварий по принципу «домино».
5. Учет неадекватных действий при токсической опасности для населения.
6. Проблемы установления «приемлемого» риска.
7. Пути снижения аварийного риска.