

А.Д. Галеев, С.И. Поникаров

**НАДЕЖНОСТЬ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Учебное пособие

2009

Галеев А.Д.

Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / А.Д. Галеев, С.И. Поникаров. – Казань : Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. – 108 с.
ISBN 978-5-7882-0689-9

В сжатой форме изложены основные положения теории надежности технических систем и техногенного риска. Основное внимание уделено вопросам количественной оценки риска, рассматриваемого как сочетание вероятности неблагоприятного события (аварии, катастрофы) и последствий этого события в виде ущерба для населения, промышленных объектов и окружающей природной среды.

Предназначено для студентов 3 курса специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств» очной формы обучения.

Подготовлено на кафедре «Машины и аппараты химических производств».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского государственного технологического университета

Рецензенты: зав. кафедрой естествознания КГФЭИ

д-р техн. наук, проф. Ю.И. Азимов

ген. директор Инженерно-технического центра

«Регионтехдиагностика» канд. техн. наук Ф.Р. Зайнутдин

ISBN 978-5-7882-0689-9

© Галеев А.Д., Поникаров С.И., 2009

© Казанский государственный
технологический университет, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	5
1.1. Основные понятия теории надежности	5
1.2. Классификация отказов	7
1.3. Показатели надежности	8
1.4. Законы распределения вероятности, используемые в теории надежности	17
1.5. Надежность систем	20
1.5.1. Последовательное и параллельное соединение элементов в систему	20
1.5.2. Классификация способов резервирования	23
1.5.3. Методы обеспечения надежности технических систем	26
ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА	27
2.1. Номенклатура основных источников аварий и катастроф	27
2.2. Классификация аварий	30
2.2.1. Классификация взрывов	31
2.2.2. Классификация пожаров	34
2.4. Поражающие факторы при авариях	35
2.4. Оценка возможных последствий аварий	38
2.4.1. Определение количества опасного вещества, участвующего в аварии	38
2.4.2. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов ..	46
2.4.3. Распространение выбросов опасных веществ в атмосфере	49
2.4.4. Поведение веществ при наличии источников зажигания	56
2.4.4. Математические модели для расчета зон действия поражающих факторов	58
2.5. Основные определения теории риска	65

2.5. Основные определения теории риска	64
2.6. Показатели риска	67
2.7. Моделирование риска от аварий на пожароопасных и взрывоопасных объектах	72
2.8. Моделирование риска от аварий на химически опасных объектах	74
2.9. F/N-диаграмма	75
2.10. Концепция приемлемого (допустимого) риска	76
2.11. Общая структура анализа техногенного риска	78
2.12. Методы снижения аварийного риска	80
2.13. «Дерево отказов»	82
2.14. «Дерево событий»	87
2.15. Аварийное реагирование	89
2.16. Нормативное регулирование безопасности и риска	91
2.17. Принципы оценки экономического ущерба от промышленных аварий	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	99
ПРИЛОЖЕНИЕ	103

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Основные понятия теории надежности

Обеспечение надежности является серьезной задачей для специалиста, эксплуатирующего сложные технические системы, отказ которых может привести к авариям и чрезвычайным происшествиям. Во-первых, он должен рассмотреть последствия каждого отказа. Неучтенные отказы могут стать впоследствии причиной невыполнения производственной программы. Во-вторых, частые отказы или длительные периоды неисправного состояния могут привести к полной потере работоспособности системы и ее непригодности к последующей эксплуатации. Третий аспект надежности связан с безопасностью для людей и окружающей среды.

Очевидно, что без знания основных вопросов математической теории надежности невозможно реализовать наилучшие условия проектирования технических систем и решить задачи безопасности при эксплуатации.

Рассмотрение вопросов теории надежности ограничивается рассмотрением понятий, законов распределения отказов, способов резервирования и основных методов расчета надежности систем до первого отказа.

Теория надежности – это наука о закономерностях отказов технических объектов. Она изучает:

- критерии и количественные характеристики надежности;
- методы анализа и повышения надежности элементов и систем на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации;
- методы испытания технических средств на надежность, методы оценки эффективности повышения надежности.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции. Надежность как сложное свойство в зависимости от назначения и условий его применения состоит из сочетания свойств: безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния.

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение хранения и транспортировки и после них.

Отказ – нарушение работоспособного состояния, случайное событие.

Работоспособное состояние – состояние, при котором объект способен выполнять заданные функции с параметрами, установленными технической документацией.

Предельное состояние – состояние объекта, при достижении которого его дальнейшее применение по назначению недопустимо или невозможно.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта (в ч, м³, км, кг и т.д.). Объект может работать непрерывно или с перерывами. В последнем случае учитывается суммарное время работы. Различают суточную наработку,

наработку до первого отказа, наработку между отказами (наработка на отказ), заданную наработку и т.д.

Наработка до первого отказа – это наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа. Характеризует безотказность как неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов.

Наработка на отказ – это среднее значение времени между соседними отказами.

Технический ресурс – наработка объекта от начала его эксплуатации (или ее возобновление после ремонта) до перехода в предельное состояние.

Восстанавливаемый объект – объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях.

Невосстанавливаемый объект – объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях.

1.2. Классификация отказов

Отказ объекта – событие, заключающееся в том, что объект полностью или частично перестает выполнять заданные функции. При полной потере работоспособности возникает полный отказ, при частичной – частичный отказ.

По причине возникновения отказы могут быть конструкционные, производственные, эксплуатационные и износные. *Конструкционный отказ* появляется в результате недостатков и неудачной конструкции объекта. *Производственный отказ* связан с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии изготовления изделий. *Эксплуатационный отказ* вызывается нарушением правил эксплуатации объекта. *Износные отказы* связаны с накоплением необратимых изменений в материалах,

приводящих к нарушению прочности, взаимодействия частей объекта.

По временному аспекту и степени предсказуемости отказы подразделяются на внезапные и постепенные.

1.3. Показатели надежности

Показатель надежности – это количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта. Если показатель надежности характеризует одно из свойств надежности, то он называется *единичным*, если же несколько свойств – *комплексным* показателем надежности. Для восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем показатели надежности различные. Единичные показатели надежности объектов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Свойство надежности	Единичный показатель надежности
Безотказность	Средняя наработка до отказа Средняя наработка на отказ Вероятность безотказной работы Интенсивность отказов
Долговечность	Средний ресурс Гамма-процентный ресурс Срок службы
Ремонтопригодность	Среднее время восстановления Вероятность восстановления в заданное время
Сохраняемость	Средний срок сохраняемости Гамма-процентный срок сохраняемости

Важным показателем является *средняя наработка объекта до отказа* для невосстанавливаемых изделий и *наработка на отказ* для восстанавливаемых изделий.

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в течение заданной наработки отказ системы не произойдет, то есть время безотказной работы τ будет больше заданной наработки t .

Если в течение наработки t из общего количества однотипных систем (изделий) N_0 работоспособными оказались лишь $N(t)$ систем, то статистическая оценка вероятности безотказной работы составит

$$P(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1.1)$$

где $n(t)$ – число отказавших изделий за время t .

Например, если вероятность безотказной работы распылителя котельной форсунки в течение наработки $t = 2000$ ч составляет $P = 0.8$, то это означает, что из большого числа распылителей данного типа в течение 2000 часов сохраняют работоспособное состояние 80 %.

Вероятность безотказной работы зависит от времени, а точнее, она является убывающей функцией наработки (рис. 1.1). Вид этой функции зависит от свойств системы и условий эксплуатации.

Функция $P(t)$ обладает следующими свойствами:

$$0 \leq P(t) \leq 1; \quad P(0) = 1; \quad P(\infty) = 0. \quad (1.2)$$

Функции $P(t)$ можно находить по данным эксплуатации.

Противоположным событием безотказной работе является отказ, следовательно, может быть введено понятие *вероятности отказа*.

Вероятность отказа равна

$$Q(t) = 1 - P(t), \quad (1.3)$$

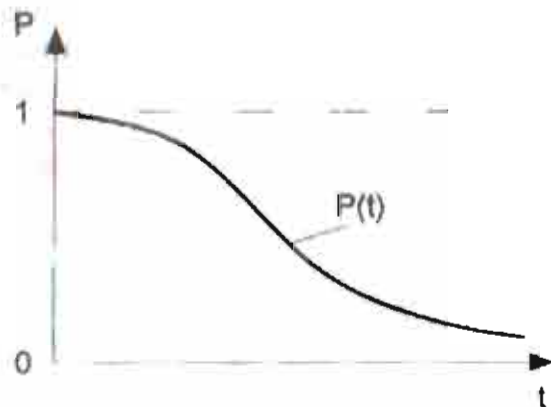


Рис. 1.1. Зависимость вероятности безотказной работы от наработки

Так как показатели $P(t)$ и $Q(t)$ характеризуют безотказность в течение $0-t$, то наряду с ними используется понятие плотности вероятности отказа (плотности распределения) для оценки безотказности в малый промежуток времени dt :

$$f(t) = \frac{dQ}{dt} = -\frac{dP}{dt} \quad (1.4)$$

Статистическая оценка плотности вероятности отказа производится по формуле

$$f(t) = \frac{\Delta n}{N_0 \Delta t} \quad (1.5)$$

где Δn – число систем, отказавших за малый промежуток времени Δt .

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это отношение числа отказавших объектов Δn в единицу времени к среднему числу объектов N_{cp} , исправно работающих в данный отрезок времени:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N_{cp} \Delta t} \quad (1.6)$$

где $N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$ – среднее число исправно работающих изделий в интервале Δt ; N_i – число изделий, исправно работающих в начале интервала Δt ; N_{i+1} – число изделий, исправно работающих в конце интервала Δt .

Из (1.5) и (1.6) следует, что

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.7)$$

Опыт эксплуатации сложных систем показывает, что изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ большого количества объектов описывается U-образной кривой (рис. 1.2).

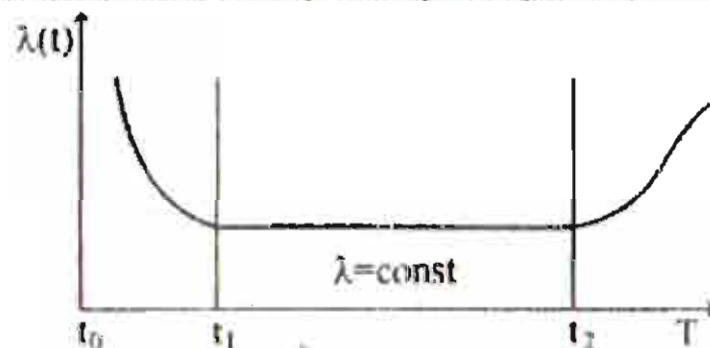


Рис. 1.2. Типичная функция интенсивности отказов

Участок убывающей интенсивности отказов (t_0-t_1) называется периодом приработки, или периодом ранних отказов. Появление отказов в этом периоде обычно вызывается конструктивными или производственными дефектами. Участок постоянной интенсивности отказов (t_1-t_2) называют периодом нормальной эксплуатации. В этот период отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего из-за случайных изменений нагрузки, несоблюдения условий

эксплуатации, неблагоприятных внешних факторов и т.п. Возрастание интенсивности отказов относится к периоду старения объекта и вызвано увеличением числа отказов из-за износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией.

Если в выражение (1.7) подставить уравнение (1.4), то после преобразований получится одно из основных уравнений надежности невосстанавливаемых изделий:

$$\begin{aligned} -\lambda(t)dt &= \frac{dP(t)}{P(t)}, \\ -\int_0^t \lambda(t)dt &= \ln P(t), \\ P(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Для частного случая $\lambda = \text{const}$:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.9)$$

Средняя наработка до отказа T_{cp} – это математическое ожидание (среднее значение) наработки до первого отказа.

Математическое ожидание T_{cp} вычисляется через частоту отказов (плотность распределения времени безотказной работы):

$$M(t) = T_{cp} = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt. \quad (1.10)$$

Так как t положительно и $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$, то

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.11)$$

По статистическим данным об отказах средняя наработка до первого отказа вычисляется по формуле

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (1.12)$$

где t_{i-1} – время начала i -го интервала; t_i – время конца i -го интервала; t_k – время, в течение которого вышли из строя все элементы; N_0 – число испытываемых образцов.

Как видно из формулы (1.12), для определения средней наработки до первого отказа необходимо знать моменты выхода из строя всех испытываемых элементов. Поэтому для вычисления T_{cp} пользоваться указанной формулой неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя элементов n_i в каждом i -м интервале времени, среднюю наработку до первого отказа лучше определять из уравнения

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cp_i}}{N_0}. \quad (1.13)$$

В выражении (1.13) t_{cp_i} и m находятся по следующим формулам

$$t_{cp_i} = (t_{i-1} + t_i)/2, \quad m = t_k / \Delta t. \quad (1.14)$$

Точная формула средней наработки до отказа представляется в виде

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.15)$$

При $\lambda = \text{const}$ средняя наработка до отказа равна

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.16)$$

Нарботкой на отказ называется среднее значение времени между соседними отказами.

Эта характеристика определяется по статистическим данным об отказах по формуле

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (1.17)$$

где t_i – время исправной работы изделия между $(i-1)$ -м и i -м отказами; n – число отказов за некоторое время t .

Из формулы (1.17) видно, что в данном случае наработка на отказ определяется по данным испытания одного образца изделия. Если на испытании находится N образцов в течение времени t , то наработка на отказ вычисляется по формуле:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j}, \quad (1.18)$$

где t_{ij} – время исправной работы j -го образца изделия между $(i-1)$ -м и i -м отказами; n_j – число отказов за время t j -го образца.

Пример. В процессе эксплуатации 100 невосстанавливаемых изделий возникали отказы, которые фиксировались в интервалах времени $\Delta t = 100$ ч. Число отказов n за время эксплуатации в течение 1000 ч приведено в табл. 1.2. Требуется определить вероятность безотказной работы изделий в течение 1000 ч, вычислить интенсивность отказов и построить график.

Таблица 1.2

Δt_i , ч	0–100	101–200	201–300	301–400	401–500
n	2	4	6	7	8
Δt_i , ч	501–600	601–700	701–800	801–900	901–1000
n	9	9	10	10	10

Решение. Вычислим $P(t)$. На основании формулы (1) имеем

$$P(100) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{100 - 2}{100} = 0,98;$$

$$P(200) = \frac{100 - 6}{100} = 0,94;$$

$$P(1000) = \frac{100 - 75}{100} = 0,25.$$

Для расчета интенсивности отказов применим формулу (6):

$$\lambda(50) = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_{cp}} = \frac{2}{100 \cdot (100 + 98)/2} = 0,202 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda(150) = \frac{4}{100 \cdot (98 + 94)/2} = 0,417 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda(950) = \frac{10}{100 \cdot (35 + 25)/2} = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч};$$

Зависимости $P(t)$ и $\lambda(t)$ приведены на рис. 1.3 и 1.4.

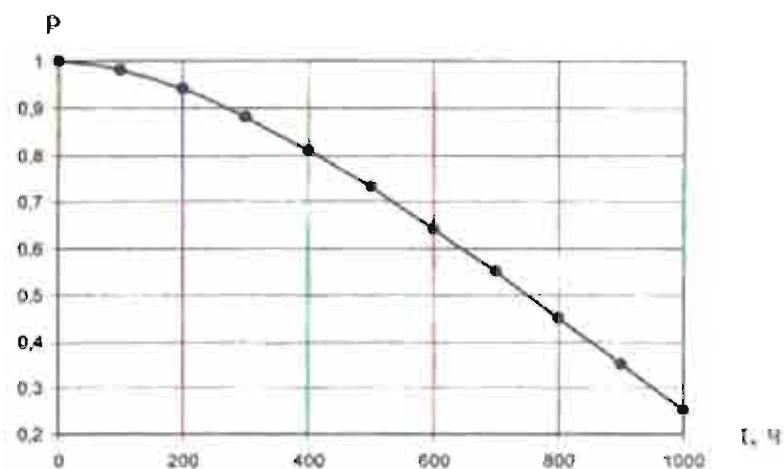


Рис. 1.3. Зависимость P от t

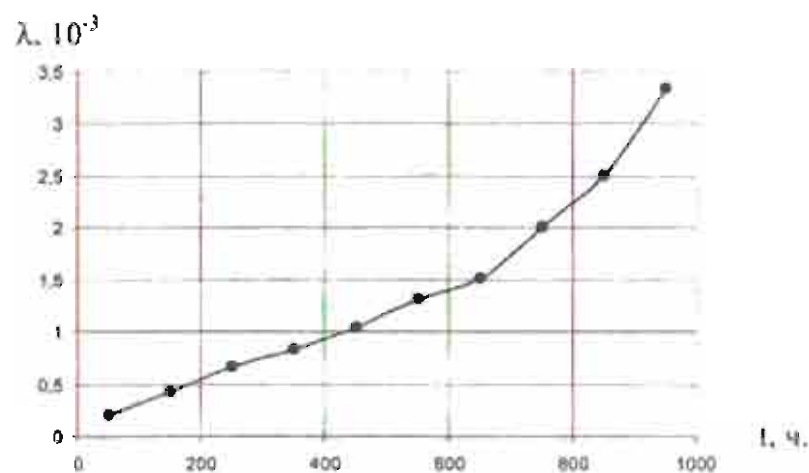


Рис. 1.4. Зависимость λ от t

1.4. Законы распределения вероятности, используемые в теории надежности

Для расчета и прогнозирования надежности необходимо знать характер изменения показателей надежности. Опыт показывает, что все разнообразие изменений показателей надежности можно свести к нескольким математическим описаниям, известным как законы распределения случайных величин. Для оценки надежности могут использоваться законы: биномиальный, экспоненциальный, нормальный, Вейбулла и гамма-распределение.

Экспоненциальное распределение отличается тем, что оно определяется только одним показателем надежности – интенсивностью отказов. Поэтому оно проще и предпочтительнее, чем остальные распределения непрерывных случайных величин. Экспоненциальное распределение применяется только тогда, когда интенсивность отказов можно считать постоянной величиной, т.е. $\lambda = \text{const}$. При этом условии средняя наработка до отказа обратно пропорциональна интенсивности отказов $T_{\text{ср}} = 1/\lambda$, поэтому экспоненциальное распределение может быть представлено в виде

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/T_{\text{ср}}}. \quad (1.19)$$

Графически закон экспоненциального распределения представлен на рис. 1.5.

Экспоненциальное распределение применяется:

- 1) при внезапных отказах, происходящих за счет нарушения правил эксплуатации, скрытых дефектов конструкции и технологии изготовления;
- 2) при анализе сложных систем, прошедших период приработки.

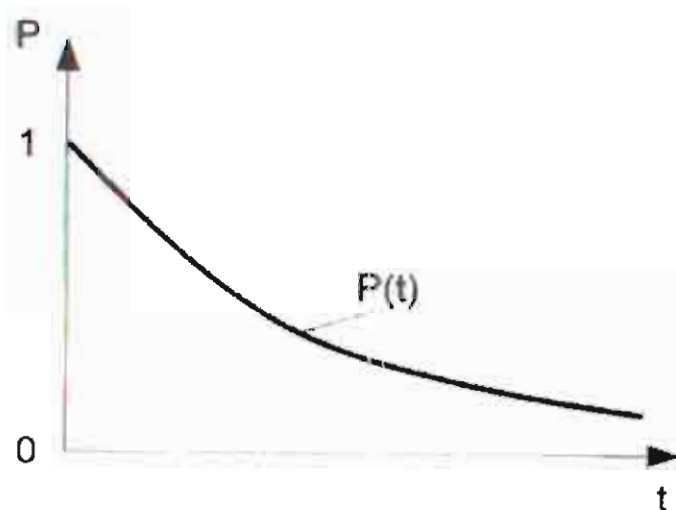


Рис. 1.5. График экспоненциального распределения

Нормальное распределение определяется двумя параметрами: средней наработкой до отказа T_{cp} и среднеквадратичным отклонением σ . Изменение вероятности безотказной работы описывается выражением

$$P(t) = 0.5 - \Phi_0\left(\frac{t - T_{cp}}{\sigma}\right), \quad (1.20)$$

где $\Phi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-x^2/2} dx$ – функция Лапласа, значения которой сведены в таблицы.

Графически закон нормального распределения представлен на рис. 1.6.

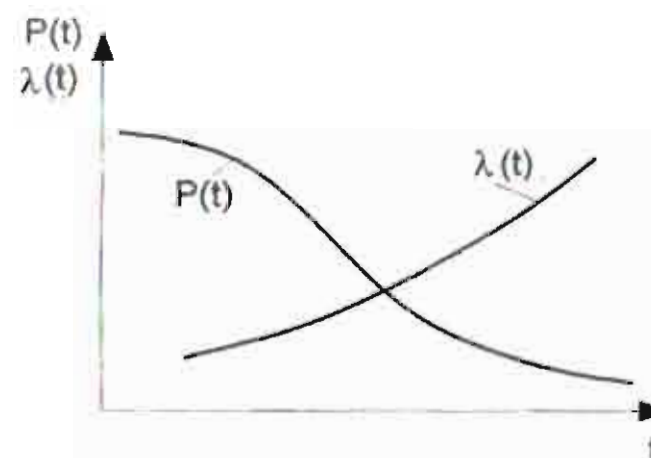


Рис. 1.6. Закон нормального распределения

Нормальное распределение применяется:

- 1) при отказах вследствие износа и старения элементов;
- 2) при отказах вследствие влияния большого количества равнозначных слабозависимых факторов.

Пример. Пусть время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Требуется вычислить вероятность безотказной работы $P(t)$ при $t = 2000$ ч и среднюю наработку до первого отказа.

Решение. Вычислим вероятность безотказной работы:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t}.$$

$$P(2000) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,9512.$$

Вычислим среднюю наработку до первого отказа:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ ч.}$$

1.5. Надежность систем

1.5.1. Последовательное и параллельное соединение элементов в систему

Под *сложной системой* в теории надежности понимается совокупность подсистем (элементов), объединенных функционально или конструктивно в соответствии с определенным алгоритмом взаимодействия при выполнении определенной задачи в процессе применения по назначению.

Под *элементом* сложной системы будем понимать ее составную часть, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами.

Расчет надежности необходим как для новых проектируемых систем, так и для систем, уже спроектированных и находящихся в эксплуатации.

Надежность системы в целом зависит от надежности входящих в нее элементов, а также от способа включения их в систему. В теории надежности различают два основных вида соединения элементов: последовательное (рис. 1.7) и параллельное (рис. 1.8)

Под *последовательным соединением* элементов в теории надежности понимают такое соединение, при котором отказ одного какого-либо элемента влечет за собой отказ всей системы.



Рис. 1.7. Схема последовательного соединения элементов

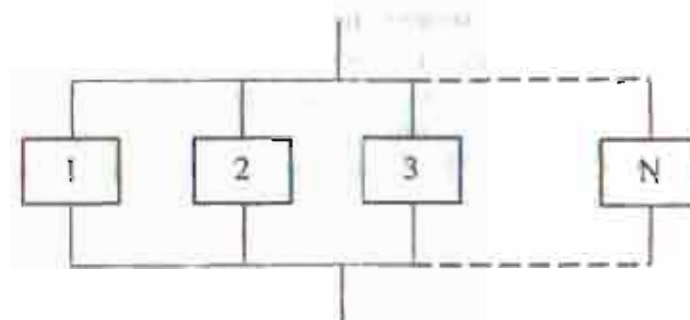


Рис. 1.8. Схема параллельного соединения элементов

Система с параллельным соединением элементов не выходит из строя, пока не отказали все ее элементы.

В качестве примера, поясняющего разницу между конструктивной схемой и моделью надежности, рассмотрим подсистему из двух масляных фильтров (рис. 1.9), которые для повышения надежности гидросистемы могут быть подключены последовательно или параллельно.

Конструктивная схема	Структурная схема	
	засорение сетки	разрыв сетки

Рис. 1.9. Конструктивная и структурная схемы при разных видах отказа

Отказ фильтра может произойти по двум основным причинам – засорение сетки или ее разрыв. В случае засорения сетки структурная схема соответствует конструктивной. Последовательное соединение фильтров только снизит надежность системы, так как отказ любого из фильтров приведет к отказу системы (необходимый поток жидкости не будет проходить через систему).

При отказе фильтров в результате разрыва сетки структурная схема противоположна конструктивной. При параллельном конструктивном соединении отказ любого фильтра будет означать отказ системы, так как при разрыве сетки поток жидкости пойдет через этот фильтр и не будет происходить ее фильтрации, что соответствует последовательному соединению элементов на структурной схеме. При последовательном конструктивном включении фильтров, наоборот, разрыв сетки одного из них не будет означать отказа, поскольку второй фильтр продолжит выполнять свои функции, что соответствует параллельному соединению на структурной схеме.

Если отказы элементов, включенных последовательно, независимы, то на основании теории умножения вероятностей независимых событий вероятность безотказной работы системы будет равна произведению вероятностей безотказной работы элементов:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \dots P_N(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t). \quad (1.21)$$

Вероятность безотказной работы системы с параллельным соединением элементов:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i(t)). \quad (1.22)$$

1.5.2. Классификация способов резервирования

Резервирование – метод обеспечения надежности, состоящий в применении дополнительных средств и возможностей с целью сохранения работоспособности объекта при отказе одного или нескольких его элементов или нарушений связей между ними. Основой резервирования является введение избыточности – дополнительных элементов.

Существует несколько методов повышения надежности за счет избыточности. Так, различают резервирование структурное, режимное, временное, функциональное, информационное и т.п. Наибольший интерес для нас представляет структурное, или схемное, резервирование, предусматривающее использование избыточных элементов структуры объекта. Классификация методов резервирования представлена на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Классификация методов резервирования [19]

По способу подключения резервных элементов и устройств различают общее и раздельное резервирование. При общем резервировании резервируется объект в целом, а в качестве резервного используется аналогичное сложное устройство (рис. 1.11). При раздельном резервировании резервируются отдельные элементы объекта (рис. 1.12).

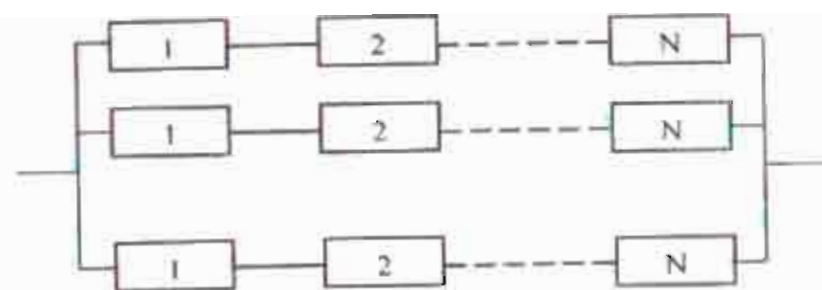


Рис. 1.11. Общее резервирование

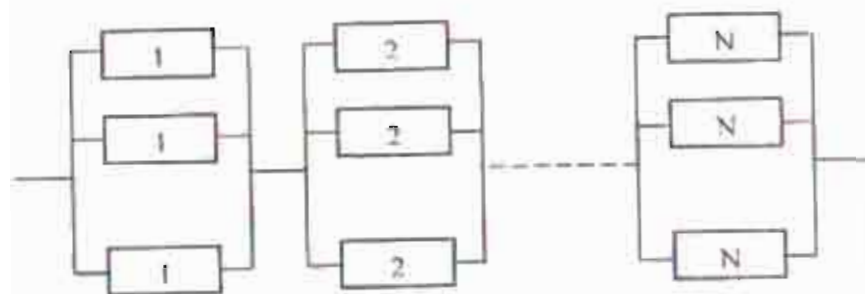


Рис. 1.12. Поэлементное, или раздельное, резервирование

Введем понятие кратности резервирования. Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых называется кратностью резервирования – m . При резервировании с целой кратностью величина m есть целое число, при резервировании с дробной кратностью величина m есть дробное несокращаемое число. Например, $m = 4/2$ означает наличие резервирования с дробной кратностью, при котором число резервных элементов

равно четырем, число основных – двум, а общее число элементов равно шести. Сокращать дробь нельзя, если $m = 4/2 = 2/1$, то это означает, что имеет место резервирование с целой кратностью, при котором число резервных элементов равно двум, а общее число элементов равно трем.

По способу включения различают резервирование постоянным и резервирование замещением. При постоянном резервировании резервные изделия подключены к основным в течение всего времени работы и находятся в одинаковом с ними режиме. При резервировании замещением резервные изделия замещают основные после их отказа.

При включении резерва по способу замещения резервные элементы до момента включения в работу могут находиться в трех состояниях:

- нагруженном;
- облегченном;
- ненагруженном.

Нагруженный резерв – такой резерв, когда резервные элементы работают в том же режиме нагрузки, что и основной элемент, т.е. основной и резервный элементы теряют надежность в равном темпе.

Облегченный резерв – такой резерв, когда элементы функционируют в более слабом нагрузочном режиме, чем основной элемент, т.е. резервные элементы теряют надежность замедленно по сравнению с основным элементом.

Ненагруженный резерв – резервные элементы практически не несут никакой нагрузки, находятся в отключенном состоянии и не подвергаются опасности отказа до момента включения, наступающего при отказе основного элемента. В этом случае необходимо специальное контролирующее и переключающее устройство, служащее для обнаружения отказа и включения очередного резервного элемента.

1.5.3. Методы обеспечения надежности технических систем

Для недопущения отказов конструктивного, производственного и эксплуатационного характера существуют типовые мероприятия, методы и средства предупредительного, контролирующего и защитного характера, обеспечивающие надежность и безопасность технических систем. Их применяют на различных этапах жизненного цикла системы – в процессе проектирования, на последующих стадиях создания и эксплуатации системы.

Пути обеспечения надежности разнообразны и могут быть связаны с повышением стойкости изделия к внешним воздействиям. Например, для механических систем это методы создания прочных, жестких, износостойких узлов за счет их рациональной конструкции, применение материалов с высокой прочностью, износостойкостью, антикоррозийностью, теплостойкостью и т.д. Другой путь обеспечения достаточной надежности технических систем – их изоляция от вредных воздействий: установка машины на фундамент, защита поверхностей от запыления и загрязнения, создание специальных условий по температуре и влажности, применение антикоррозийных покрытий, виброизолирующих устройств и т.д.

Активным средством для решения проблемы надежности и безопасности является применение автоматики, блокировок в ответственных технологических процессах, исключающих возможности разрушения элементов системы при нарушении технологического процесса.

Не менее значимым является обучение персонала вопросам безопасной эксплуатации технических систем.

Большую роль для обеспечения надежности играет периодический контроль и диагностика состояния оборудования.

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА

Развитие и интенсификация промышленных производств в современных условиях неизбежно ведет к возрастанию числа аварий и масштабов последствий, связанных с неконтролируемым выбросом токсичных или взрывоопасных веществ в атмосферу. В связи с этим возникает необходимость использования научно обоснованных подходов для обеспечения безопасности людей. Главной составной частью управления промышленной безопасностью является анализ риска аварий, который предполагает получение количественных оценок потенциальной опасности промышленных объектов.

Раздел «Анализ риска» является ключевым разделом декларации безопасности, планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций, паспортов промышленной безопасности и другой документации, необходимость разработки которой обусловлена существующим законодательством. Результаты анализа риска также используются при экспертизе промышленной безопасности, страховании, экономическом анализе безопасности по критериям «стоимость-безопасность-выгода», оценке воздействия хозяйственной деятельности на окружающую природную среду и при других процедурах, связанных с анализом безопасности.

2.1. Номенклатура основных источников аварий и катастроф

Авария – разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ.

К категории *опасных производственных объектов (ОПО)* относятся объекты, на которых:

- получают, используют, перерабатываются, хранятся, транспортируются, уничтожаются опасные (воспла-

меняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные) вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды;

- используется оборудование, работающее под давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115 °С;

- используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскапаторы, канатные дороги, фуникулеры;

- получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов;

- ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях.

Опасность – явления, процессы, действия или условия, чреватые наличием потенциала, который может нанести ущерб здоровью людей, привести к их гибели, нанести ущерб окружающей среде, привести к потере сохранности материальных объектов антропогенного происхождения. Опасности, содержащиеся в объектах химического профиля, обусловлены наличием в них токсического и энергетического потенциала.

Опасность аварии – угроза, возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде вследствие аварии на ОПО. Опасности аварий на ОПО связаны с возможностью разрушения сооружений и (или) технических устройств взрывом, выбросом опасных веществ, разлетом осколков, тепловым излучением от пожара пролива или огненного шара с последующим причинением ущерба человеку, имуществу и (или) нанесением вреда окружающей природной среде.

Идентификация опасностей аварии – процесс выявления и признания, что опасности аварий на ОПО существуют, и определение их характеристик.

Химически опасный объект (ХОО) – объект, при аварии на котором может произойти массовое отравление людей, сельскохозяйственных животных и растений либо химическое заражение окружающей природной среды химическими веществами в количествах, превышающих естественный уровень их содержания в среде.

Технологические опасности обусловлены:

- значительными объемами хранения опасных веществ;
- экстремальными физическими условиями (высокие и низкие температуры, высокие давления, вакуум, циклические изменения давления и температуры, гидравлические удары).

Причины аварий:

а) технологические нарушения:

- отклонения технологических параметров: давления, температуры, расхода, концентрации, скорости реакции, теплоты реакции, изменения фазового состояния, загрязнения;
- спонтанные реакции: полимеризация, неконтролируемые процессы, внутренний взрыв, разложение;
- разгерметизация трубопроводов, резервуаров, сосудов, отказ прокладок, сальников;
- неисправности оборудования: насосов, клапанов, измерительных приборов, датчиков, блокировок;
- неисправности систем обеспечения: электрической, подачи воздуха или азота, водоснабжения, охлаждения, теплообмена, вентиляции;
- отказ системы административного управления и субъективные ошибки.

в) внешние события: экстремальные погодные условия, землетрясения, воздействия других аварий, случаи вандализма, диверсии.

2.2. Классификация аварий

В целях упорядочения отнесения происходящих аварий к тому или иному виду вводится следующая их классификация [25]:

1) взрыв пылегазовоздушной смеси с возгоранием (в технологической системе, производственном помещении, на открытой площадке);

2) взрыв реакционной среды внутри технологической системы (аппарата) в результате отклонения параметров технологического процесса от регламентированных значений;

3) пожар, связанный с разливом взрывопожароопасных веществ (неконтролируемое горение, причинившее материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества и окружающей природной среде);

4) выброс или истечение химически опасных, взрывопожароопасных и горючих веществ;

5) полное или частичное разрушение (повреждение) технологического оборудования и трубопроводов, зданий и сооружений, не связанное с взрывом, пожаром;

6) события, перечисленные в п.п. 1 – 5, в результате которых имеются пострадавшие, полностью или частично выведено из строя оборудование и прекращен выпуск продукции (без учета перехода на резервное оборудование);

7) взрыв пылегазовоздушной смеси без возгорания (хлопок);

8) загорание, самовозгорание в результате утечки опасных веществ при разгерметизации технологической системы, не повлекшие за собой вывода из строя технологического оборудования;

9) переполнение емкостной аппаратуры (железнодорожных цистерн, резервуаров, аппаратов, контейнеров, баллонов и другого оборудования) с разливом взрывопожароопасных и вредных продуктов.

2.2.1. Классификация взрывов

В многочисленной справочной литературе взрывные явления определяются по-разному, однако общим во всех определениях является то, что взрыв – это происходящее внезапно («стремительно», «мгновенно», «в виде всплеска») событие, при котором высвобождается внутренняя энергия и формируется избыточное давление. Такой процесс сопровождается сильным звуковым эффектом.

Взрыв – быстропротекающий процесс физических и химических превращений веществ, сопровождающийся освобождением значительного количества энергии в ограниченном объеме, в результате которого в окружающем пространстве образуется и распространяется ударная волна, способная привести или приводящая к возникновению техногенной чрезвычайной ситуации.

Ударная волна – распространяющаяся с высокой скоростью переходная область в газе, жидкости или твердом теле, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости среды.

Характерный профиль ударной волны при взрыве топливно-воздушной смеси (ТВС) показан на рис. 2.1 [5].

Области взрывных волн, давление в которых превышает давление окружающей среды P_0 , называют положительными фазами. Области, где давление ниже атмосферного P_0 , называют отрицательными фазами.

Положительная фаза волны давления характеризуется амплитудой избыточного давления P'_s и продолжительностью положительной фазы t' . Отрицательная фаза, или фаза разрежения, характеризуется продолжительностью t'' и амплитудой P''_s .

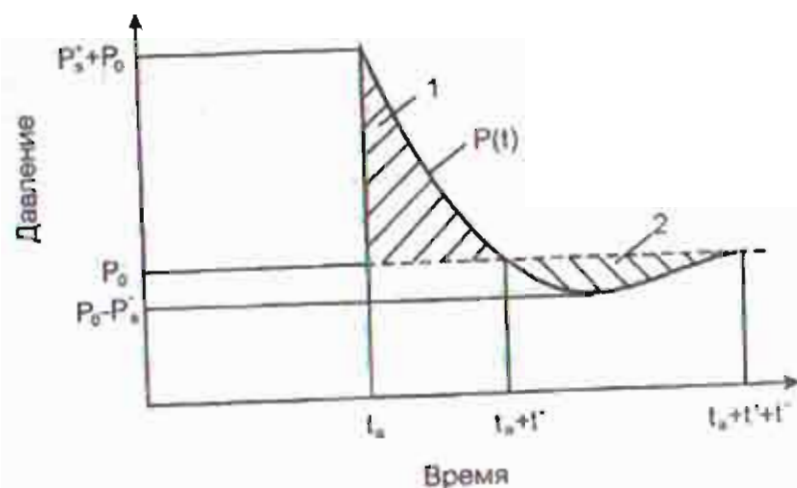


Рис. 2.1. Характерный профиль ударной волны:
1 – положительная фаза; 2 – отрицательная фаза

Важнейшими параметрами взрывной волны являются положительные i_s^+ и отрицательные i_s^- импульсы:

$$i_s^+ = \int_{t_a}^{t_a+t^+} [P(t) - P_0] dt; \quad i_s^- = \int_{t_a+t^+}^{t_a+t^++t^-} [P_0 - P(t)] dt. \quad (2.1)$$

Взрывы классифицируют по происхождению выделившейся энергии на химические и физические.

Источником энергии при химических взрывах являются экзотермические реакции взаимодействия горючих веществ с окислителями или термического разложения нестабильных соединений.

К физическим взрывам относятся:

- взрывы емкостей под давлением (баллоны, паровые котлы);
- взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости (BLEVE);

- взрывы при сбросе давления в перегретых жидкостях;
- взрывы при смешении двух жидкостей, температура одной из них намного превышает температуру кипения другой.

В зависимости от скорости распространения пламени взрыв может быть детонационным или дефлаграционным.

Дефлаграционный взрыв – взрыв парогазовой смеси, при котором скорость распространения горения определяется теплопроводностью среды. При этом скорость распространения пламени составляет десятки и сотни метров в секунду, но не превышает скорость распространения звука в данной среде (300–320 м/с).

Применительно к случайным промышленным взрывам под дефлаграцией обычно понимают горение облака с видимой скоростью порядка 100–300 м/с, при которой генерируются ударные волны с максимальным давлением 20–100 кПа [5].

Детонационный взрыв – взрыв парогазовой смеси, при котором скорость распространения горения определяется скоростью распространения ударной волны. В этом случае скорость распространения пламени превышает скорость распространения звука и достигает 1–5 км/с. Это происходит часто вследствие турбулизации материальных потоков, вызывающей сильное искривление и большое увеличение поверхности фронта пламени. При этом возникает ударная волна, во фронте которой резко повышаются плотность, давление и температура смеси. При возрастании этих параметров смеси до самовоспламенения горючего вещества возникает детонационная волна, являющаяся результатом сложения ударной волны и образующейся зоны сжатой, быстрореагирующей (самовоспламеняющейся) смеси.

Многочисленными исследованиями было показано, что вероятность детонационного сгорания реально создаваемых взрывоопасных сред весьма мала, а возможность взрывного горения, сопровождающегося ударной волной, создается при

эффективной видимой скорости пламени, равной примерно 0,2М (М – число Маха, определяемое отношением фактической скорости перемещения газа к скорости звука в данной среде). Для углеводородовоздушных смесей это соответствует видимой скорости пламени около 60 м/с [4].

Энергию взрыва парогазовых сред определяют по теплотам сгорания горючих веществ в смеси с воздухом (окислителем); конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) – по теплоте, выделяющейся при их детонации (реакции разложения); при физических взрывах систем со сжатыми газами и перегретыми жидкостями – по энергиям адиабатического расширения парогазовых сред и перегрева жидкости.

Теплоты сгорания горючих газов в топливно-воздушной смеси берутся из справочных данных. Значения теплоты сгорания составляют (МДж/кг): для незамещенных углеводородов (метан, пропан, бутан) – 40-50, водорода – 120, углеводородов с одним заместителем – кислородом (этиленоксид, ацетон) – 27-28, с хлором (хлорбензол, этилхлорид) – 19-27 [5].

Удельная теплота взрыва конденсированных ВВ характеризуется значениями от 1,5 до 7,5 МДж/кг. Тепловая энергия, выделяющаяся при детонации тротила, составляет 4,52 МДж/кг.

2.2.2. Классификация пожаров

Пожаром называют неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства.

Пожар разлива – горение вещества разлива, испаряющегося с поверхности жидкости [10].

Вспышечный пожар – режим сгорания паровоздушного облака, при котором скорость перемещения фронта пламени

значительно меньше звуковой. Характеризуется пренебрежимо малым значением возникающего при превращении избыточного давления [10].

Огненный шар – крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с перегретой жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

Облако пара в воздухе, обогащенное горючим веществом, не взрывается, а горит по внешней оболочке и вытягивается, образуя огненный шар. Поднимаясь, огненный шар принимает грибовидную форму, ножка которого – это сильное восходящее конвективное течение, которое может всасывать отдельные предметы, зажигать их и разбрасывать горящие предметы на большие площади.

К пожарам следует также отнести факельное горение струй газа или жидкости.

2.4. Поражающие факторы при авариях

Поражающий фактор источника техногенной чрезвычайной ситуации (ЧС) – составляющая опасного происшествия, характеризующаяся физическими, химическими и биологическими действиями или проявлениями, которые определяются или выражаются соответствующими параметрами.

Поражающее воздействие источника техногенной ЧС – негативное влияние одного или совокупности поражающих факторов источника техногенной чрезвычайной ситуации на жизнь и здоровье людей, на сельскохозяйственных животных и растения, объекты народного хозяйства и окружающую природную среду.

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или

инного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

При авариях на объектах химической и нефтехимической отраслей промышленности выделяют следующие основные поражающие факторы:

- ударная волна, возникающая при разного рода взрывах;
- тепловое излучение пожара пролива и огненного шара;
- действие токсических веществ, участвующих в технологическом процессе.

Разрушающее действие ударной волны характеризуют избыточное давление в ее фронте (передней границе) и импульс взрыва.

Избыточное давление – это разность между максимальным давлением во фронте ударной волны и нормальным атмосферным давлением перед этим фронтом. Так, избыточное давление в пределах детонирующего облака смеси этиленоксида с воздухом составляет 2 МПа. Большинство же промышленных зданий разрушается от значительно меньших давлений: 25–30 кПа при внешних и 20–25 кПа при внутренних взрывах [5].

При взрывах топливно-воздушных смесей существенную роль играют длительность действия ударной волны и связанный с ней параметр – импульс взрыва. Для оценки предполагаемого уровня разрушений широко применяется графический метод оценки разрушающей способности ударных волн с помощью диаграмм влияния давления и импульса на уровень и характер разрушения. Примером такой диаграммы является диаграмма $P-i$ (рис. 2.2).

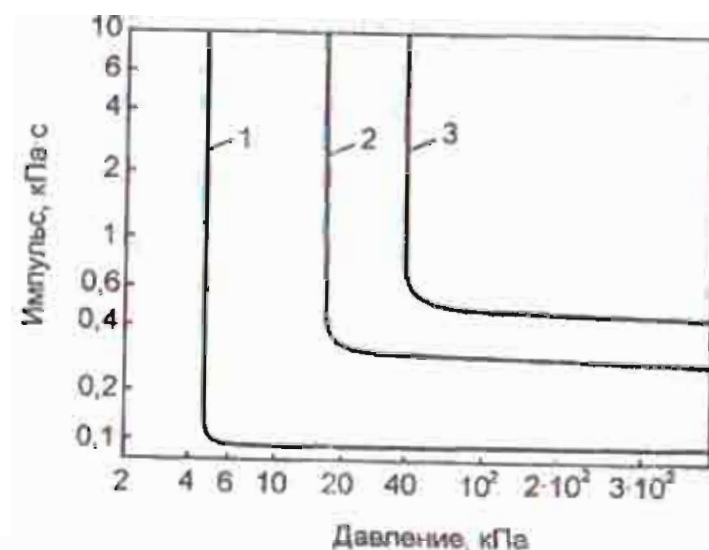


Рис. 2.2. $P-i$ диаграмма для оценки уровня поражения промышленных зданий: 1 – граница минимальных повреждений; 2 – граница значительных повреждений; 3 – разрушение зданий (50–75 % стен разрушено)

Поражающее действие теплового излучения характеризуется интенсивностью теплового излучения – теплового потока излучения, падающего на площадку единичного размера (кВт/м^2).

Для количественной характеристики уровня токсического воздействия используется токсодоза. Ингаляционная токсодоза – произведение средней концентрации токсичного вещества, воздействующего через органы дыхания, и времени пребывания человека в зараженном воздухе. Ингаляционные токсодозы измеряются в мг·мин/м^3 . Средняя смертельная токсодоза – ингаляционная токсодоза, вызывающая смертельный исход. Средняя пороговая токсодоза – ингаляционная токсодоза, вызывающая начальные симптомы поражения.

2.4. Оценка возможных последствий аварий

Прогноз последствий аварийных событий базируется на использовании математических моделей и методов математического моделирования.

При формировании математических моделей большое значение придается правильному выбору моделей источников. К подобным моделям относятся модели истечения вещества, растекания жидких веществ по поверхности, модели вскипания и испарения жидкости с поверхности. Эти модели позволяют охарактеризовать источник, вызывающий образование облака паров опасных веществ.

Модели полей поражающих факторов включают модели концентрационных полей токсичных веществ, модели температурных полей, возникающих в случае пожаров и взрывов, модели распространения давления и осколков при взрывах.

2.4.1. Определение количества опасного вещества, участвующего в аварии

Поведение жидкостей при выбросе. Для оценки зон действия поражающих факторов (ударной волны при взрыве, теплового излучения при пожаре пролива и огненном шаре, высоких концентраций токсичных веществ и т.д.) необходимо определить количество опасного вещества, участвующего в аварии. С этой целью используются различные методики, имеющие нормативный характер.

При аварийных выбросах жидкости ее испарение сильно зависит от условий, в которых содержится вещество в технологической системе.

При выбросе перегретой жидкости наблюдается явление мгновенного испарения. Перегретая жидкость, как известно, отличается тем, что давление ее паров превышает атмосферное.

В химической технологии приходится иметь дело с огромными массами перегретых жидкостей. К ним относятся сжиженные углеводородные газы, хлор, аммиак, находящиеся в технологических системах при температуре окружающей среды и давлении, превышающем атмосферное. Перегретыми могут быть жидкости, имеющие температуру кипения выше температуры окружающей среды и находящиеся при высоких температурах и давлениях. При разгерметизации емкости с перегретой жидкостью в результате резкого снижения давления и нарушения термодинамического баланса происходит мгновенное вскипание определенной части жидкой фазы за счет высвобождения внутренней энергии. При этом устанавливается новое состояние равновесия, а температура оставшейся жидкой фазы понижается. При мгновенном испарении жидкости формируется *первичное облако* пара. Для оценки доли вещества ψ , «мгновенно» переходящего в пар, можно применить простое соотношение [10]:

$$\psi = \frac{H_T - H_K}{r}, \quad (2.2)$$

где H_T – удельная энтальпия жидкости при температуре окружающей среды T ; H_K – удельная энтальпия жидкости в точке кипения при атмосферном давлении; r – удельная теплота парообразования при атмосферном давлении.

Для иллюстрации на рис. 2.3 представлены зависимости ψ от температуры хранения [10].

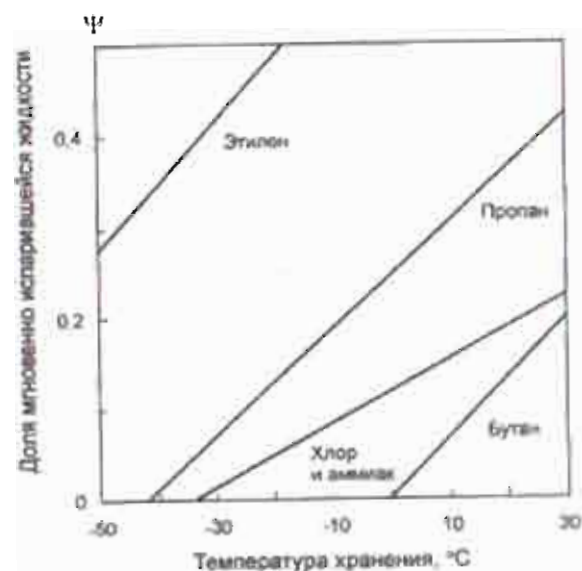


Рис. 2.3. Зависимость ψ от температуры хранения

После мгновенного выделения внутренней энергии устанавливается равновесие жидкости и паров при давлении, близком к атмосферному. Так, при разрушении резервуара с пропаном начальные и конечные условия могут выглядеть следующим образом:

Таблица 2.1

Начальные и конечные условия равновесия

Параметры	Начальные условия	Конечные условия
Температура, °C	26,9	-42,1
Давление, бар	10	1

При разлитии жидкости, температура кипения которой при атмосферном давлении ниже температуры окружающей среды, жидкость переходит в состояние кипения, интенсивность которого пропорциональна скорости теплопритока от окружающей среды (нагретого подстилающего слоя и атмосферного

воздуха). При этом существуют два режима кипения – пузырьковый и пленочный (рис. 2.4). При умеренных перепадах температур между кипящей жидкостью и твердым телом ($\Delta T < 10^\circ\text{C}$) тепловой поток будет пропорционален ΔT^3 . В определенной точке это соотношение нарушается, так как пузырьковое кипение переходит в пленочное, когда слой пара отделяет жидкость от подложки. Минимум теплового потока достигается в точке Лейденфроста. Дальнейшее повышение разницы температур ΔT за точкой Лейденфроста вызывает увеличение теплового потока, пропорциональное ΔT в степени 0,75. Это повышение значительно медленнее, чем при пузырьковом кипении. По истечении некоторого времени вследствие охлаждения поверхности теплоотдача от нее резко снижается и при равенстве температур поверхности и жидкости прекращается.



Рис. 2.4. Теплоотдача при кипении пролива

При разливе жидкостей, температура кипения которых при атмосферном давлении выше температуры окружающей среды, парообразование происходит в основном за счет диффузионных процессов. На испарение таких жидкостей влияет только ветер.

При испарении жидкости с поверхности аварийного разлива формируется *вторичное облако*.

Таким образом, при определении интенсивности испарения с поверхности аварийного разлива руководствуются тем положением, что при температуре окружающего воздуха, низкой по сравнению с температурой кипения жидкости, процессе испарения лимитируется диффузией, а при высоких – теплоотдачей [15].

Математические модели для расчета парообразования при аварийных выбросах жидкостей. Испарение с поверхности аварийного разлива, обусловленное диффузионными процессами и теплоподводом от окружающей среды, определяется по эмпирическому выражению [22]:

$$W = 10^{-6} \eta \sqrt{M P_n}, \quad (2.3)$$

где η – коэффициент, принимаемый по табл. 2.2 [22] в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения; P_n – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости, кПа; M – молярная масса паров жидкости, кг/кмоль.

Масса испарившейся жидкости по зеркалу испарения:

$$G' = W \cdot F_{\text{ж}} \cdot \tau_{\text{ж}}, \quad (2.4)$$

где $F_{\text{ж}}$ – площадь поверхности зеркала испарения жидкости, м²; $\tau_{\text{ж}}$ – время испарения жидкости, с.

Таблица 2.2

Значения коэффициента η при температуре воздуха t_0

Скорость воздушного потока над зеркалом испарения, м/с	Значения коэффициента η				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Давление насыщенных паров P_n для однокомпонентных жидкостей может определяться по формуле [22]:

$$P_n = P_0 \exp \left(\frac{r \cdot M}{R} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right), \quad (2.5)$$

где P_0 – атмосферное давление, Па; R – универсальная газовая постоянная: $R=8310$ Дж/(кг·кмоль); T_n – температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К; T – абсолютная температура жидкой фазы, К; r – удельная теплота испарения жидкости при температуре T , Дж/кг.

Длительность испарения жидкости принимается равной времени ее полного испарения, но не более 3600 с [16].

При разливе жидкости на открытых пространствах площадь испарения принимается равной площади, ограниченной обвалованием, или при отсутствии обвалования – из условия разлива 1 л продукта на площади 0,15 м² [16]. Согласно методикам [12, 23], при отсутствии обвалования толщину слоя разлившегося опасного вещества следует принимать равной 0,05 м. При выборе подхода для определения площади разлива опасного вещества на неограниченной

поверхности следует исходить из свойств подстилающего слоя и особенностей рельефа местности.

Если температура кипения жидкости ниже температуры окружающей среды, то при ее разливе за счет теплоотдачи от твердой поверхности происходит интенсивное парообразование этой жидкости. Масса образующихся при этом паров G' может определяться по формуле [22]:

$$G' = 2 \frac{T_0 - T_x}{r} \frac{\varepsilon}{\sqrt{\pi}} \frac{F_n}{F_x} \sqrt{\tau}, \quad (2.6)$$

где T_0 , T_x – температуры твердой поверхности (окружающей среды) и кипения жидкости; r – удельная теплота испарения сжиженного газа при температуре T_x ; F_n – площадь твердой поверхности; $\varepsilon = \sqrt{\lambda_n \rho_n C_n}$; λ_n , ρ_n , C_n – коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость материала твердой поверхности соответственно; τ – время контакта жидкости с твердой поверхностью, принимаемое в расчет.

Общее количество паров, образующихся при испарении сжиженных газов из пролива:

$$G = G' + G'', \quad (2.7)$$

При выбросе перегретой жидкости определяется количество пара, поступившего в окружающую среду в результате мгновенного вскипания жидкой фазы.

Количество жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования, вычисляется по формуле [12]:

$$G_{\text{жж}} = m_{\text{ж}} \left(1 - \exp \left(- \frac{C_p (T - T_x + |T - T_x|)}{2 \cdot r} \right) \right), \quad (2.8)$$

где T – температура жидкости в оборудовании; $m_{\text{ж}}$ – количество жидкой фазы, участвующей в аварии; C_p – осредненная в соответствующем диапазоне температур удельная теплоемкость жидкости.

В результате мгновенного вскипания жидкости происходит дробление жидкой фазы на фрагменты, потеря устойчивости последних с образованием более мелких капель – аэрозолей. Количество вещества, переходящего в пераэрозное облако в виде аэрозолей [12], равно

$$G_{\text{аэ}} = \min \{ G_{\text{жж}} \cdot m_{\text{ж}} - G_{\text{жж}} \}. \quad (2.9)$$

Количество вещества, содержащегося в оборудовании в виде парогазовой смеси, определяется по формуле [12]:

$$G_{\text{га}} = (1 - \alpha) \frac{M}{R} \frac{P \cdot V}{273 + t}, \quad (2.10)$$

где α – объемная доля оборудования, заполненная газовой фазой; M – молекулярная масса газа, кг/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, равная 8310 Дж/(кг·кмоль); P – давление в оборудовании, Па; t – температура в оборудовании, °C; V – объем оборудования.

Суммарная масса пара, поступившего в окружающее пространство, равна

$$m = G' + G'' + G_{\text{жж}} + G_{\text{аэ}} + G_{\text{га}}. \quad (2.11)$$

При разливе жидкостей, температура кипения которых при атмосферном давлении выше температуры окружающей среды, масса пара, поступившего в окружающее пространство, равна

$$m = G' + G_{\text{га}}, \quad (2.12)$$

где $G_{\text{га}}$ необходимо определять с учетом наличия воздуха в свободном объеме оборудования.

2.4.2. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов

Пожаро- и взрывоопасность веществ и материалов определяется показателями, характеризующими предельные условия возникновения горения и максимальную опасность, создаваемую при возникшем горении. В простейшем случае, когда горючим веществом является газ, основными показателями являются: концентрационные пределы распространения пламени (КПР), называемые также пределами воспламенения или взрываемости, нормальная скорость распространения пламени, температура самовоспламенения, минимальная энергия зажигания, максимальное давление взрыва. Производными от них являются: скорость нарастания давления взрыва, минимальное взрывоопасное содержание кислорода.

Концентрационные пределы распространения пламени – минимальное и максимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любом расстоянии от источника зажигания. Предел, определяемый минимальным содержанием горючего компонента в смеси, называется нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР), а предел, характеризуемый максимально возможным содержанием горючего компонента, при котором еще возможно распространение пламени, называется верхним концентрационным пределом распространения пламени (ВКПР). Для наглядности на рис. 2.5 КПР показаны схематически. Горение возможно в области составов между НКПР и ВКПР, называемой областью воспламенения. Вне этой области горение в режиме распространения пламени невозможно.

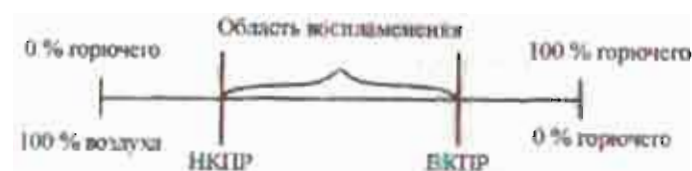


Рис. 2.5 Схема концентрационных пределов распространения пламени

Минимальная энергия зажигания – наименьшая энергия электрического разряда, способная воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь горючего вещества с воздухом.

Параметр используется при обеспечении электростатической искробезопасности технологических процессов.

Нормальная скорость распространения пламени – скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшего газа в направлении, перпендикулярном его поверхности.

Температура самовоспламенения – наименьшая температура окружающей среды, при которой наблюдается самовоспламенение вещества.

Самовоспламенение – резкое увеличение скорости экзотермических реакций, сопровождающееся пламенным горением или взрывом.

Максимальное давление взрыва – наибольшее избыточное давление, возникающее при дефлаграционном сгорании газо-, паро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа.

Скорость нарастания давления взрыва – производная давления взрыва по времени на восходящем участке зависимости давления взрыва горючей смеси в замкнутом сосуде от времени.

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) – такая концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение пламени в смеси становится невозможным при любой концентрации горючей смеси, разбавленной данным флегматизатором. Обычно МВСК определяют при флегматизации горючих смесей азотом, диоксидом углерода.

При оценке пожароопасности жидкостей перечисленные выше показатели дополняются следующими: температура вспышки; температура воспламенения; температурные пределы ТП воспламенения: нижний – НТП и верхний – ВТП.

Температура вспышки ($T_{всп}$) – минимальная пожароопасная температура жидкости, при которой внесенный извне в паровое пространство над жидкостью источник зажигания вызывает быстрое сгорание паров, но при удалении источника зажигания горение прекращается. По физическому смыслу температура вспышки – это минимальная температура жидкости, при которой давление насыщенных паров жидкости создает концентрацию паров над жидкостью, соответствующую НКПР. В зависимости от летучести жидкости, характеризуемой температурой вспышки и позволяющей судить о возможности образования взрывоопасной среды, жидкости подразделяются на легко воспламеняющиеся (ЛВЖ) и горючие (ГЖ). К ЛВЖ относятся жидкости с $T_{всп} \leq 61^\circ\text{C}$ и к ГЖ – с $T_{всп} > 61^\circ\text{C}$.

Нагрева жидкостей до $T_{всп}$ недостаточно для устойчивого их горения. Для обеспечения требуемой интенсивности испарения для устойчивого горения необходим нагрев жидкостей до более высокой температуры, называемой температурой воспламенения.

Температурные пределы воспламенения – это температуры жидкостей, при которых давление насыщенных паров создает концентрацию паров, соответствующую концентра-

ционному пределу распространения пламени. Зависимость между ТП и КПР выражается следующим образом:

$$НКПР = \frac{P_{НТП}}{P_0} \cdot 100 (\%); \quad ВКПР = \frac{P_{ВТП}}{P_0} \cdot 100 (\%), \quad (2.13)$$

где $P_{НТП}$, $P_{ВТП}$ – давление насыщенных паров при НТП и ВТП соответственно; P_0 – атмосферное давление.

Пожаровзрывоопасные свойства веществ и материалов используются для определения возможного вида аварийного процесса, который может сопровождать выброс данного вещества.

2.4.3. Распространение выбросов опасных веществ в атмосфере

Для расчета размеров зон, в пределах которых газо- или паровоздушные смеси при аварийном поступлении горючих газов и паров летучих жидкостей в открытое пространство сохраняют взрывоопасные или токсически опасные концентрации, используют модели рассеяния примеси в атмосфере.

Примесь в атмосфере распространяется за счет конвективного переноса, обусловленного скоростью ветра, а также диффузии. Движение воздуха в приземном слое атмосферы практически всегда имеет турбулентный характер. Причиной диффузионного переноса примеси считается не столько движение молекул за счет концентрационной диффузии, сколько воздушные вихри различных размеров, возникающие у поверхности земли. Размеры турбулентных вихрей, кинетическая энергия движения воздуха в них, а следовательно, и скорость рассеяния примеси будут определяться в первую очередь двумя факторами. Первый – характер изменения температуры воздуха вблизи поверхности земли, определяющий характер конвективного движения над поверхностью.

Второй – шероховатость поверхности, вдоль которой движется воздушный поток, поскольку вихри возникают при обтекании препятствий, таких как здания, лес, кустарник или неровности рельефа.

Интенсивность турбулентного переноса существенно зависит от температуры поверхности земли и распределения температуры воздуха в приземном слое атмосферы. Если вблизи поверхности земли температура воздуха выше, чем в более высоких областях приземного слоя, то состояние атмосферы будет неустойчивым (конвекция). И наоборот, устойчивому состоянию атмосферы соответствует более высокая температура воздуха на некоторой высоте над землей, чем непосредственно над ее поверхностью (инверсия). Состояние атмосферы характеризуют степенью вертикальной устойчивости либо классом устойчивости.

При наличии положительного градиента температуры по высоте (инверсия) возникает подавление турбулентности, что препятствует рассеянию примеси. Инверсия наблюдается в ночное время суток. В дневное время наблюдается изотермия (отсутствие градиента температуры по высоте) или конвекция (понижение температуры с высотой). При конвекции усиливается перемешивание примеси за счет возникновения конвективных течений, что способствует снижению размеров зон опасных концентраций.

Категорию устойчивости атмосферы можно оценить по значению градиента температуры из табл. 2.3.

Таблица 2.3

Классы устойчивости атмосферы в зависимости от градиента температуры [31]

Классификация	Класс устойчивости по Паскуиллу	$\Delta T/\Delta z$, °C/100 м
Сильная неустойчивость	A	-1,9
Умеренная неустойчивость	B	-1,9 – -1,7
Слабая неустойчивость	C	-1,7 – -1,5
Равновесное состояние	D	-1,5 – -0,5
Слабая устойчивость	E	-0,5 – 1,5
Умеренная устойчивость	F	1,5–4,0
Сильная устойчивость	G	>4,0

Для облаков, плотность которых мало отличается от плотности воздуха, используется гауссова модель рассеяния газообразных веществ, согласно которой распределение газа в вертикальном и горизонтальном направлениях за счет атмосферной турбулентности подчиняется закону распределения Гаусса. Динамика распределения концентраций согласно гауссовской модели показана на рис. 2.6.

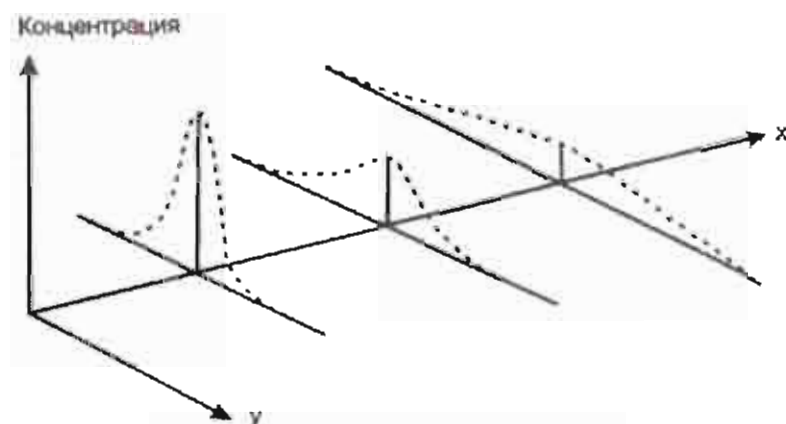


Рис. 2.6. Динамика распределения концентраций по гауссовской модели

Согласно гауссовской модели концентрация в поле ветра со скоростью U в зависимости от времени и пространства для постоянно действующего источника (например, испаряющегося пролива) изменяется следующим образом [12]:

$$C(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\sigma_x\sigma_yU} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (1.38)$$

где q – мощность непрерывного точечного источника; U – скорость ветра на высоте 10 м, м/с; σ_x, σ_y – горизонтальные дисперсии, м; σ_z – вертикальная дисперсия, м; x – расстояние от источника, м; y – поперечное расстояние от оси шлейфа, м; z – высота над поверхностью земли, м; h – высота источника, м.

Направление ветра совпадает с направлением оси x , а начало координат лежит в основании источника. В гауссовской модели также предполагается, что имеет место отражение загрязняющего вещества от поверхности земли.

Параметры распределения Гаусса $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ определяются из эмпирических формул, меняются как функция расстояния и зависят от погодных условий.

В том случае, если имеем дело с залповым выбросом (например, при мгновенном вскипании жидкости), концентрации примеси внутри облака рассчитываются по формуле [12]:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{((2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z)} G(x, y, z, t),$$

$$G(x, y, z, t) = \exp\left(-\frac{(x-Ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1.40)$$

где Q – масса первичного облака

Гауссовские модели учитывают только два процесса, происходящие с выбросом в атмосфере: перемещение в поле ветра и рассеяние за счет атмосферной турбулентности. Естественно, что и приемлемую точность они дают в тех зонах, где доминируют указанные процессы: либо на большом удалении от места выброса, либо во всем диапазоне расстояний, но при слабом выбросе. Таким образом, данные модели не позволяют учитывать влияние на процесс рассеяния сил плавучести, возникающих за счет разности плотностей паровоздушного облака и окружающего воздуха.

Тяжелые газы, с точки зрения промышленной безопасности, представляют наибольшую опасность для человека и окружающей среды, поскольку распространяются главным образом вдоль поверхности земли. Силы гравитации препятствуют их перемешиванию с воздухом. Вследствие этого

тяжелые газы и пары жидкостей имеют свой характер и специфику рассеяния.

Многие выбросы при промышленных авариях в начальный момент времени имеют плотность большую, чем воздух. Это может быть обусловлено различными причинами (или их сочетанием) [30]:

- высокой молекулярной массой вещества. Например, вещества с молярной массой больше молярной массы воздуха (29,5 г/моль) при нормальных условиях – тяжелые газы, к ним относятся хлор, сероводород, пропан, бутан, пары нефти, бензина и др.;

- низкой температурой. Например, метан при нормальных условиях имеет плотность меньше плотности воздуха, однако при температуре, равной температуре кипения, его плотность становится выше плотности воздуха, и тогда метан уже относится к тяжелым газам. Рассеяние испарившегося от пролива захоложенного метана следует рассчитывать по модели тяжелого газа;

- наличием аэрозолей. Например, аммиак при нормальных условиях и при температуре кипения – легкий газ, соответственно и при смешении с воздухом образующиеся смеси имеют плотность меньше, чем воздух. Однако наличие в смеси капельных включений может привести к тому, что не только без воздуха, но и при подмешивании воздуха в процессе распространения получающиеся смеси будут вести себя как тяжелые газы;

- протеканием химических реакций, которые приводят к образованию тяжелого газа. Например, при выбросе тетроксид азота N_2O_4 происходит его расщепление до NO_2 , последний вступает в эндотермическую реакцию с водяным паром, содержащимся в атмосфере, образуя туман. Туман, состоящий из капелек HNO_3 , вызывает охлаждение облака и соответственно увеличение его плотности.

Выбросы тяжелого газа под действием силы тяжести быстро оседают на землю, в результате чего образуются невысокие, но протяженные облака (высота таких облаков составляет до нескольких метров, а поперечный размер – до нескольких десятков и даже сотен метров). В результате площадь покрываемой облаком поверхности земли оказывается на порядок больше той площади, которая была бы покрыта, если бы плотность облака равнялась плотности воздуха. Более того, при выбросах тяжелого газа наблюдается такое явление, как распространение облака против ветра, которое отсутствовало бы, если бы газ был нейтральным [13].

В рассеянии облака тяжелого газа можно выделить две стадии. На первой стадии облако опускается под действием силы тяжести. В этой фазе влияние метеорологических условий незначительно. Во второй фазе, когда плотность облака незначительно отличается от плотности воздуха, рассеивание примеси происходит при сильном влиянии погодных условий.

При моделировании процессов рассеяния тяжелых газов обычно используется «ящичная» модель [13], когда облако представляется цилиндром, внутри которого концентрация опасного вещества постоянна, а на границе равна нулю. Через границы «ящика» происходит турбулентный обмен, в результате которого в «ящик» всасывается воздух, его объем растет, а концентрация опасного вещества падает. При этом «ящико»-цилиндр перемещается под действием ветра.

Разработанные «ящичные» модели обычно решаются численными методами. К недостаткам этой модели следует отнести отсутствие учета рельефа местности и наличие застройки. Учесть эти факторы позволяют модели, основанные на численном решении трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики и тепломассообмена. На сегодня данный подход реализован в нескольких программных продуктах, например PHOENIX [8], ANSYS [29] и FLUENT [6].

оболочки. Если масса выброса составляет порядка тонны, то вспышечный пожар может перерасти в огненный шар. В определенных ситуациях может произойти взрыв парового облака.

2.4.4. Математические модели для расчета зон действия поражающих факторов

Взрыв паровоздушного облака на открытой площадке. Избыточное давление ΔP , кПа, развиваемое при сгорании газопаровоздушных смесей, рассчитывают по формуле [16]:

$$\Delta P = P_0 (0,8 m_{\text{пр}}^{0,33} / r + 3 m_{\text{пр}}^{0,66} / r^2 + 5 m_{\text{пр}} / r^3), \quad (2.14)$$

где P_0 – атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа); r – расстояние от геометрического центра газопаровоздушного облака, м; $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса газа или пара, кг, рассчитанная по формуле

$$m_{\text{пр}} = (H_{\text{ст}} / H_0) \cdot m \cdot Z, \quad (2.15)$$

где $H_{\text{ст}}$ – удельная теплота сгорания газа или пара, Дж/кг; Z – коэффициент участия, который допускается принимать равным 0,1; H_0 – константа, равная $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг; m – масса горючих газов и (или) паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство, кг;

Импульс волны давления i , Па·с, рассчитывают по формуле

$$i = 123 m_{\text{пр}}^{0,66} / r. \quad (2.16)$$

Взрыв резервуара с перегретой жидкостью. Если происходит внезапное разрушение сосуда (системы) с перегретой жидкостью, то она быстро испаряется с образованием паров в окружающей среде и формированием ударных волн. Разрушающая способность взрыва может характеризоваться внешней удельной работой термодина-

мического перехода из состояния жидкости при регламентированных (предаварийных) условиях в состояние при атмосферных условиях и выражаться как $E = U_1 - U_2$ (U – внутренняя энергия).

Суммарное энерговыделение взрыва [15]:

$$E_{\text{эф}} = C_{\text{эф}} m (T - T_{\text{кин}}), \quad (2.17)$$

где $C_{\text{эф}}$ – константа, равная 500 Дж/(кг·К); m – масса перегретой жидкости, содержащейся в аппарате, кг; T – температура жидкой фазы, содержащейся в аппарате, К; $T_{\text{кин}}$ – нормальная температура кипения жидкой фазы.

При этом $m_{\text{пр}}$ определяется соотношением

$$m_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{эф}}}{H_0}. \quad (2.18)$$

Взрыв сосуда со сжатым инертным газом. Энергия взрыва рассчитывается как работа адиабатического расширения сжатого газа A [22]:

$$A = \frac{1}{k-1} P V' \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (2.19)$$

где k – показатель адиабаты; P – давление в аппарате, Па; V' – объем аппарата, занятый газом; P_0 – атмосферное давление, Па.

При этом $m_{\text{пр}}$ определяется соотношением

$$m_{\text{пр}} = \frac{A}{H_0}. \quad (2.20)$$

Огненный шар. Расчет интенсивности теплового излучения огненного шара q , кВт/м², производят по формуле [7]:

$$q = E_f F_q \tau, \quad (2.21)$$

где E_f – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, кВт/м²; допускается принимать E_f равной 450 кВт/м²; F_q – угловой коэффициент облученности; τ – коэффициент пропускания атмосферы.

Значение F_q определяется по формуле

$$F_q = \frac{H/D_s + 0.5}{4[(H/D_s + 0.5)^2 + (r/D_s)^2]^{1.5}}, \quad (2.22)$$

где H – высота центра огненного шара, м; допускается принимать H равной $D_s/2$; D_s – эффективный диаметр огненного шара, м; r – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м.

Эффективный диаметр огненного шара D_s находится по формуле

$$D_s = 5.33 \cdot m^{0.327}, \quad (2.23)$$

где m – масса жидкости, поступившей в окружающее пространство, кг.

Время существования огненного шара t_s (с) определяется по формуле:

$$t_s = 0.92 m^{0.703}. \quad (2.24)$$

Коэффициент пропускания атмосферы τ рассчитывается по формуле

$$\tau = \exp[-7.0 \cdot 10^{-4}(\sqrt{r^2 + H^2} - D_s/2)]. \quad (2.25)$$

Пожар пролива. Интенсивность теплового излучения q , кВт/м², для пожара пролива горючей жидкости вычисляется по формуле [7]:

$$q = E_f F_q \tau, \quad (2.26)$$

где E_f – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, кВт/м² (значение E_f принимается на основе

имеющихся экспериментальных данных). Для некоторых жидких углеводородных топлив указанные данные приведены в табл. 2.4.

F_q – угловой коэффициент облученности;

τ – коэффициент пропускания атмосферы;

Таблица 2.4

Значения E_f для некоторых жидких углеводородных топлив

Топливо	E_f , кВт/м ²					$\dot{m}$, кг/(м ² ·с)
	$d=10$ м	$d=20$ м	$d=30$ м	$d=40$ м	$d=50$ м	
СПГ (метан)	220	180	150	130	120	0,08
СУГ (пропан- бутан)	80	63	50	43	40	0,1
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельное топливо	40	32	25	21	18	0,04
Нефть	25	19	15	12	10	0,04

Рассчитывается эффективный диаметр d (м) пролива:

$$d = \sqrt{4F/\pi}, \quad (2.27)$$

где F – площадь пролива, м².

Вычисляется высота пламени H , м:

$$H = 42d \left(\frac{\dot{m}}{\rho_a \sqrt{gd}} \right)^{0.61}, \quad (2.28)$$

где $\dot{m}$ – удельная массовая скорость выгорания ЛВЖ (ГЖ), кг/(м²·с); ρ_a – плотность окружающего воздуха, кг/м³; g – ускорение свободного падения, принимаемое равным 9.81 м/с².

Определяется угловой коэффициент облученности F_q :

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}. \quad (2.29)$$

где F_v , F_H – факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно, определяемые по выражениям

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{S_1} \operatorname{arctg} \left(\frac{h}{\sqrt{S_1^2 - 1}} \right) + \frac{h}{S} \left\{ \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{S_1 - 1}{S_1 + 1}} \right) - \frac{A}{\sqrt{A^2 - 1}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{(A+1)(S_1 - 1)}{(A-1)(S_1 + 1)}} \right) \right\} \right] \quad (2.30)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left[\frac{(B-1/S_1)}{\sqrt{B^2 - 1}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{(B+1)(S_1 - 1)}{(B-1)(S_1 + 1)}} \right) - \frac{(A-1/S_1)}{\sqrt{A^2 - 1}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{(A+1)(S_1 - 1)}{(A-1)(S_1 + 1)}} \right) \right] \quad (2.31)$$

$$A = (h^2 + S_1^2 + 1)/(2S_1); \quad (2.32)$$

$$B = (1 + S_1^2)/(2S_1); \quad (2.33)$$

$$S_1 = 2r/d; \quad (2.34)$$

$$h = 2H/d. \quad (2.35)$$

где r – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м.

Определяется коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp[-7.0 \cdot 10^{-4} (r - 0.5d)], \quad (2.36)$$

Факельное горение струи жидкости. В случае вертикального факела интенсивность его теплового излучения может быть рассчитана по методу для пожара пролива. При этом

эффективные диаметры d и высота H пламени могут быть определены с помощью эмпирических формул [15]:

$$\frac{H}{d_0} = 220 \left(\frac{u^2}{gd_0} \right)^{0.2}; \quad (2.37)$$

$$\frac{d}{d_0} = 25 \left(\frac{u^2}{gd_0} \right)^{0.3}, \quad (2.38)$$

где d_0 – диаметр отверстия, через которое происходит истечение жидкости, м; g – ускорение свободного падения (9.81 м/с^2); u – скорость истечения жидкости через отверстие, м/с.

Горение газового факела. В качестве модельного приближения достаточно сложной и спонтанно меняющейся геометрической фигуры пламени используется, как правило, усеченный конус [27].

Облучение произвольной точки пространства рассчитывается как

$$q = E^* F_q \tau, \quad (2.39)$$

где F_q – угловой коэффициент облучения; τ – коэффициент пропускания излучения атмосферой; E^* – интенсивность излучения с единицы поверхности пламени $E^* = Q_{\text{изл}}/F_{\phi}$.

Установлено, что с достаточной степенью точности внешнее излучение количественно можно охарактеризовать как часть общего теплового потенциала (баланса) сгорания топлива:

$$Q_{\text{изл}} = q^m \cdot H_{\text{ст}} \cdot k \cdot \eta = \eta \cdot Q, \quad (2.40)$$

где Q – общее тепловыделение факела; q^m – массовый расход; $H_{\text{ст}}$ – низшая теплота сгорания; k – коэффициент «недожога»; η – коэффициент излучения в окружающем пространстве:

$$\eta = 0.11 + 0.21e^{-1.00323u_0}, \quad (2.41)$$

где u_0 – скорость истечения газа, м/с.

Площадь излучающей поверхности (усеченного конуса):

$$F_{\phi} = \frac{\pi}{4} (D_1^2 + D_2^2) + \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2} \sqrt{H^2 + \left(\frac{D_2 - D_1}{2}\right)^2}, \quad (2.42)$$

где D_1 , D_2 – малый и большой диаметры усеченного конуса соответственно.

Длина усеченного конуса для спокойной (безветренной) атмосферы:

$$H = 1.34 Q^{0.49}, \quad (2.43)$$

где размерность Q – МВт; H – м.

Малый диаметр усеченного конуса:

$$\frac{D_1}{D_s} = (13.5e^{-4\Omega} + 1.5) \left\{ 1 - \left[1 - \frac{1}{15} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_0}} \right] e^{-70 R_{is} C} \right\}, \quad (2.44)$$

где $R_{is} = \left(\frac{g}{D_s^2 \cdot u_0^2} \right)^{1/3} \cdot D_s$; $C = 1000e^{-100\Omega} + 0.8$; $\Omega = w_a/u_0$;

$D_s = d_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_a}}$; ρ_0 , ρ_a – плотности истекающего газа и воздуха соответственно; d_0 – диаметр трубопровода; w_a – скорость ветра, м/с.

Большой диаметр усеченного конуса:

$$\frac{D_2}{H} = (0.18y^{-1.5\Omega} + 0.31) (1 - 0.46e^{-25\Omega}), \quad (2.45)$$

Расчет углового коэффициента облученности и коэффициента пропускания атмосферы производится по формулам (2.29) и (2.36) как для наклонного цилиндра эквивалентной площади.

2.5. Основные определения теории риска

При решении комплексных вопросов безопасности в развитых странах широко применяется методология риска,

основу которой составляет определение последствий и вероятности нежелательных событий. Принятие эффективных управленческих решений в области обеспечения промышленной безопасности неотделимо от решения задач по оценке и сравнению степени опасности аварий на опасных производственных объектах. Используя количественные показатели риска, в принципе можно «измерять» потенциальную опасность и даже сравнивать опасности различной природы.

Анализ риска – процесс идентификации опасностей и оценки риска для отдельных лиц, групп населения, объектов, окружающей природной среды и других объектов рассмотрения.

Оценка риска аварии – процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и (или) окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания.

Риск аварии – мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на ОПО и тяжесть ее последствий. Основными количественными показателями риска аварии являются:

- **технический риск** – вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования ОПО;
- **индивидуальный риск** – частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий;
- **потенциальный территориальный риск** – пространственное распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня;
- **коллективный риск** – ожидаемое количество поражений в результате возможных аварий за определенное время;

- социальный риск – зависимость частоты событий, в которых пострадало на том или ином уровне число людей больше определенного, от этого определенного числа людей;
- ожидаемый ущерб – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенное время.

2.6. Показатели риска

Одной из наиболее часто употребляемых характеристик опасности является индивидуальный риск – вероятность (или частота) поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности при реализации неблагоприятного случайного события.

Обычно индивидуальный риск измеряется вероятностью гибели в исчислении на одного человека в год. Если говорится, что величина индивидуального риска, связанная с дорожно-транспортным происшествием, равна $1 \cdot 10^{-4}$, то в статистическом плане это означает, что в течение года в автокатастрофах погибнет каждый десяти тысячный человек.

В общем случае количественно (численно) индивидуальный риск R выражается отношением числа пострадавших людей n к общему числу riskующих N за определенный период времени t (обычно год) [20]:

$$R = \frac{n}{N \cdot t} \quad (2.46)$$

При расчете распределения риска по территории вокруг объекта индивидуальный риск определяется потенциальным территориальным риском и вероятностью нахождения человека в районе возможного действия опасных факторов.

Потенциальный территориальный риск – пространственное распределение вероятности (или частоты) реализации негативного воздействия определенного уровня.

Потенциальный территориальный риск в точке (x, y) оценивается по формуле

$$RI(x, y) = \sum_j P(A)_i P_q(x, y) P(L)_j, \quad (2.47)$$

где $P(A)_i$ – вероятность аварийного выброса за год по сценарию i ; $P_q(x, y)$ – вероятность реализации механизма воздействия j в точке (x, y) для сценария выброса i ; $P(L)_j$ – вероятность летального исхода (или заболевания) при реализации механизма воздействия j (в качестве сценариев механизма воздействия могут рассматриваться тепловые поражения людей, поражения ударной волной, поражение осколками и т.д.).

Индивидуальный риск поражения человека, находящегося в определенной точке пространства, следует оценивать по формуле [20]:

$$R = \sum_j P(A)_i P_q(x, y) P(L)_j f_i, \quad (2.48)$$

где f_i – условная вероятность присутствия данного человека (индивидуума) в данной точке (области) пространства при i -м сценарии аварии.

Для работника предприятия с 8-часовым рабочим днем для большинства сценариев f_i можно принять равной 0,3 (независимо от числа смен на производстве). При $f_i = 1$ получаем величину потенциального территориального риска – максимальное значение индивидуального риска поражения человека [20].

Значения $P(A)_i$ определяют из статистических данных или на основе методик, изложенных в нормативных документах. Характерные вероятности аварий основных технологических элементов представлены в табл.2.5.

Вероятность летального исхода $P(L)_j$ учитывает то, что одна и та же мера негативного воздействия может вызвать последствия различной тяжести у разных людей (в зависимости от возраста, пола, здоровья человека, индивидуальной

чувствительности к ядам в случае токсического воздействия и др.). Иными словами, не только возникновение аварии, но и «эффект поражения» в рамках концепции анализа риска носит вероятностный характер. Величина $P(L)_j$ определяется по значению пробит-функции Pr (см. табл. П2).

Величина Pr в общем случае описывается выражением

$$Pr = a + b \cdot \ln S, \quad (2.49)$$

где a, b – константы для каждого вещества или процесса, характеризующие специфику и меру опасности его воздействия; S – величина воздействующего фактора (ударной волны, теплового излучения, токсического поражения).

Таблица 2.5

Рекомендуемые данные по авариям для стационарных объектов [27]

Тип объекта	Вероятность аварии	Размер утечки
Резервуары (хранилища) с одинарной оболочкой или сосуды под давлением	$1,0 \cdot 10^{-4}$	90 % случаев – выброс содержимого через отверстие 0,025 м до тех пор, пока утечка не будет остановлена; 10 % случаев – все содержимое выбрасывается мгновенно
Трубопроводы	$5,0 \cdot 10^{-4}$ на 1 м в год	90 % случаев – выброс содержимого через отверстие 0,025 м в стенке трубопровода до тех пор, пока утечка не будет остановлена; 10 % случаев – полный разрыв трубопровода
Загрузочные шланги (если используются более 10 раз в год)	$1,0 \cdot 10^{-4}$ на операцию загрузки или разгрузки	100 % случаев – выброс через полный диаметр шланга при загрузке/разгрузке до остановки потока

Потенциальный территориальный риск, в соответствии с названием, представляет собой потенциал максимально возможного риска для конкретных объектов воздействия, находящихся в данной точке пространства. Данная мера риска не зависит от факта нахождения объекта воздействия (например, человека) в данном месте пространства. Предполагается, что вероятность нахождения объекта воздействия равна единице.

Результаты расчета потенциального риска отображаются на карте предприятия и прилегающих районов в виде замкнутых линий равных значений (рис. 2.7).

Уравнения для определения показателей риска приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Уравнения для вычисления показателей риска [2]

Потенциальный территориальный риск	$RI(x, y) = \sum_i P(A)_i P_{ij}(x, y) P(L)_j$
Средний индивидуальный риск	$\bar{R} = \left[\sum_{x,y} RI(x, y) N(x, y) \right] / \sum_{x,y} N(x, y) = F/N$
Интегральный риск (общее число смертельных исходов)	$F = \sum_{x,y} RI(x, y) N(x, y) = \bar{R}N$
$N(x, y)$ – численность людей в ячейке (единичной площадке) с координатами (x, y) ; $P(A)_i$ – вероятность аварии по сценарию i ; $P_{ij}(x, y)$ – вероятность реализации механизма воздействия j в точке (x, y) для сценария выброса i ; $P(L)_j$ – вероятность летального исхода (или заболевания) при реализации механизма воздействия j .	

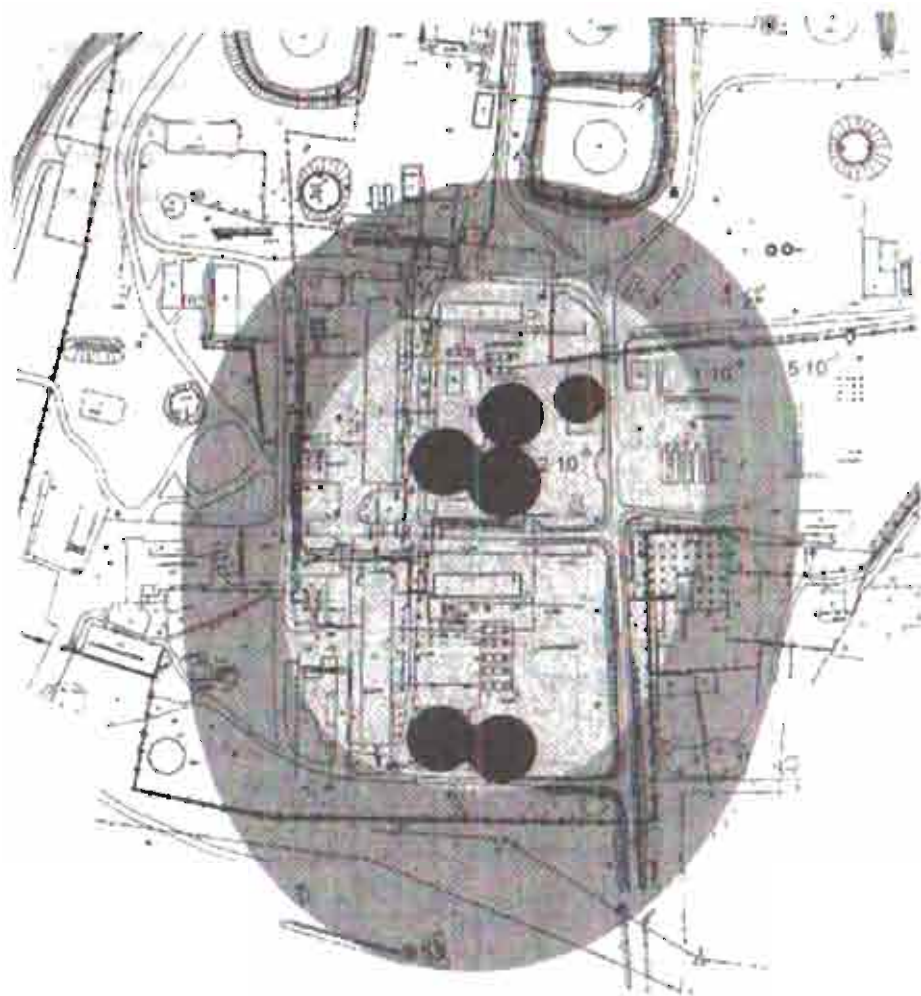


Рис. 2.7. Распределение потенциального риска по территории объекта, на котором возможны аварии с выбросом горючих веществ (цифрами у изолиний указана частота смертельного поражения человека за один год при условии его постоянного местонахождения в данной точке)

2.7. Моделирование риска от аварий на пожароопасных и взрывоопасных объектах

После выявления на каждом из принятых к рассмотрению ПВОО видов аварий, специфики их возникновения и развития, расчета полей потенциальной опасности этих аварий и определения вероятности реализации их негативного потенциала оценку индивидуального риска можно проводить по формуле

$$\bar{R} = \left[\sum_{x,y} RI(x,y)N(x,y) \right] / \sum_{x,y} N(x,y), \quad (2.50)$$

где $N(x, y)$ - численность людей на площадке с координатами (x, y) ; $RI(x, y)$ - потенциальный риск в точке с координатами (x, y) :

$$RI(x, y) = \sum_i P(A)_i P_q(z, y) P(L)_j, \quad (2.51)$$

где $P(A)_i$ - вероятность аварии по сценарию i (в качестве сценариев аварии могут рассматриваться: нарушение герметичности замкнутых объемов за счет коррозии, нарушения за счет технологического режима и т.п.); $P_q(x, y)$ - вероятность реализации механизма воздействия j в точке (x, y) для сценария выброса i (в качестве механизмов воздействия могут рассматриваться: тепловые поражения людей, поражения ударной волной, обломками и т.п.) $P(L)_j$ - вероятность летального исхода при реализации механизма воздействия j .

Для определения вероятности летального исхода $P(L)_j$ используется вероятностный критерий - пробит-функция Pr .

Для определения пробит-функции при взрыве используется выражение [16]:

$$Pr = 5 - 0.26 \cdot \ln(V), \quad (2.52)$$

$$V = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{0.4} + \left(\frac{290}{i} \right)^{0.3},$$

где ΔP – избыточное давление, Па; i – импульс волны давления, Па·с.

Величина пробит-функции при поражении человека тепловым излучением описывается выражением [16]:

$$Pr = -14.9 + 2.56 \cdot \ln(t \cdot q^{1.33}), \quad (2.53)$$

где t – эффективное время экспозиции, с; q – интенсивность теплового излучения, кВт/м², определяемая в соответствии с методом расчета интенсивности теплового излучения.

Величина эффективного времени экспозиции t может быть вычислена по формулам:

– для огненного шара

$$t = 0.92 m^{0.107}; \quad (2.54)$$

– для пожара пролива

$$t = t_0 + x/u, \quad (2.55)$$

где m – масса горючего вещества, содержащегося в оборудовании, кг; t_0 – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях, с (может быть принято равным 5 с [16]); x – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зона, где интенсивность теплового излучения меньше 4 кВт/м²); u – средняя скорость движения человека к безопасной зоне, м/с (может быть принята равной 5 м/с).

2.8. Моделирование риска от аварий на химически опасных объектах

При авариях на химически опасных объектах поражающий фактор будет связан с токсическим воздействием газообразных веществ.

При токсическом поражении пробит-функция может быть вычислена по уравнению вида [27]:

$$Pr = a + b \ln(D_z), \quad (2.56)$$

где a и b – константы для каждого вещества, характеризующие специфику и меру опасности его воздействия; D_z – поглощенная субъектом доза негативного воздействия.

В случае пребывания субъекта в атмосфере с постоянной концентрацией опасного химического вещества значение пробит-функции определяется из соотношения [27]:

$$Pr = a + b \ln(C^n \tau), \quad (2.57)$$

где C – концентрация; τ – время воздействия; n – показатель степени, характеризующий механизм воздействия и природу токсиканта. В более общем случае токсическая нагрузка должна вычисляться с учетом изменения концентрации вещества за принятый период времени T [27]:

$$D_z = \int_0^T C^n(\tau) d\tau, \quad (2.58)$$

Для расчета пространственно-временного распределения концентраций опасного химического вещества в атмосфере при аварийном выбросе может использоваться методика, изложенная в [12].

2.9. F/N-диаграмма

Социальный риск определяется функцией распределения потерь (ущерба), у которой есть установившееся название – F/N-кривая (в зарубежных работах – кривая Фармера). F/N-

диаграммы могут быть использованы для представления зависимости частоты реализации опасности от ее масштаба. F/N-диаграмма описывает зависимость частоты реализации неблагоприятных событий F, в результате которых погибло не менее N человек, от этого количества человек. Подобные графики строятся в логарифмическом масштабе, если количество данных и диапазон их изменений очень велики. Функция распределения потерь $\bar{F}(n)=1-F(n)$, где F(n) – функция распределения выживаемости), описывается формулой

$$\bar{F}(n) = P(N \geq n), \quad (2.59)$$

где N – величина людских потерь.

Интегральная функция распределения людских потерь есть разрывная ступенчатая функция, скачки которой происходят в точках, соответствующих возможным значениям случайной величины N, и равны вероятностям этих значений. Пример F/N-диаграммы представлен на рис.2.8.

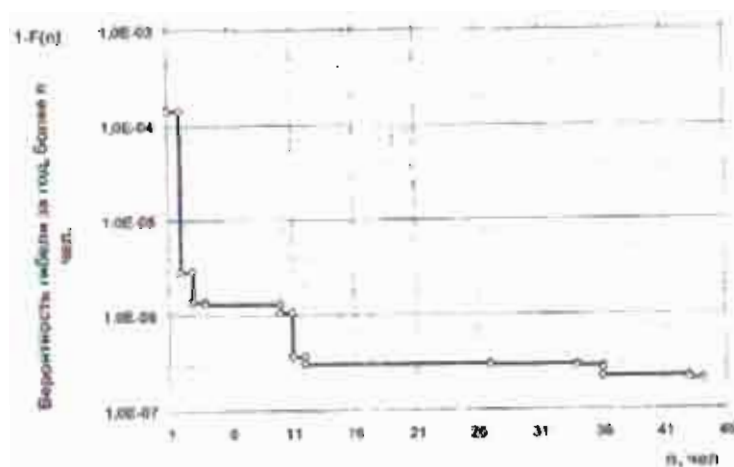


Рис. 2.8. Интегральная функция распределения числа погибших при аварии на установке переработки нефти

2.10. Концепция приемлемого (допустимого) риска

Создать абсолютно безопасные технологии невозможно, поэтому следует стремиться к достижению хотя бы такого уровня риска, с которым общество в данный период времени может смириться.

В силу этих обстоятельств в промышленно развитых странах начиная с конца 70-х – начала 80-х годов начался переход от концепции «абсолютной безопасности» к концепции «приемлемого риска».

Приемлемый риск аварии – риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально-экономических соображений. Риск эксплуатации объекта является приемлемым, если ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на этот риск.

Решения о допустимости уровня риска, как правило, принимаются исходя из среднего значения индивидуального риска для субъекта:

$$\bar{R} = \left[\sum_{x,y} RI(x,y)N(x,y) \right] / \sum_{x,y} N(x,y). \quad (2.60)$$

Следует подчеркнуть, что выбор значения приемлемого уровня индивидуального риска во многом зависит от экономического состояния страны. Так, в Нидерландах в 1985 году концепция приемлемого риска была принята в качестве государственного закона. По этому закону вероятность смерти для населения от опасностей, связанных с техносферой, считается недопустимой, если составляет в год более 10^{-6} , и приемлемой, если эта величина меньше 10^{-8} 1/год. Для других стран Западной Европы приемлемый уровень риска выбирается в диапазоне 10^{-6} – 10^{-8} в год исходя из экономических и социальных причин.

Поскольку границы оправданного риска трудно рационально обосновать, при решении расчетных или

эксплуатационных технических задач следует использовать сравнение с риском в аналогичных ситуациях. В любом районе страны, независимо от наличия или отсутствия там каких-либо техногенных объектов, существует некоторая вероятность того, что человек погибнет в результате несчастного случая, преступления или иного неестественного события. Эта категория в статистике называется «смерть от неестественных причин». Поэтому индивидуальный риск от техногенной деятельности сравнивается с риском от этой категории.

В табл. 2.7 представлены значения фоновых показателей риска гибели людей (год⁻¹) в Российской Федерации за 2002 г. [21].

Таблица 2.7

Значения вероятности смерти людей от «неестественных причин»

Причина	10 ⁻⁶ чел/год
ЧС природного характера	2,3
Авиакатастрофы	2,0
Пожар	138
Дорожно-транспортные происшествия	230
Убийства	309
Любые причины	16200
Транспортные травмы (всех видов)	291
Случайное отравление алкоголем	312

В нашей стране приняты следующие значения приемлемого индивидуального риска в расчете на человека в год [26]:

- персонал предприятий – $1 \cdot 10^{-5}$;
- население, находящееся в санитарно-защитной зоне, – $1 \cdot 10^{-6}$;
- население региона – $1 \cdot 10^{-6}$.

2.11. Общая структура анализа техногенного риска

Общая логическая последовательность количественного анализа техногенного риска состоит из следующих этапов [2]:

- обоснование целей и задач анализа риска;
- анализ технологических особенностей производственного объекта. Идентификация потенциальных опасностей и классификация потенциальных событий, способных привести к нерегламентированным выбросам опасных веществ или скоротечным выделениям энергии;
- определение вероятности (или частоты) возникновения нежелательных событий;
- определение общих количеств и продолжительности выбросов опасных веществ или выделения энергии в окружающее пространство для всего спектра нежелательных событий;
- определение критериев поражения, а также форм или допустимых уровней разового или систематического негативного воздействия различных источников на окружающую среду;
- обоснование физико-математических моделей и расчет пространственно-временного переноса и распространения, а также трансформации исходных факторов опасности в окружающей среде с учетом ее природно-климатической и географической специфики;
- построение полей потенциального риска вокруг каждого из выделенных источников опасности;
- расчет прямых и косвенных ущербов;
- анализ структуры риска. Исследование влияния различных факторов на уровень и пространственно-временное распределение риска вокруг источников;
- оптимизация организационно-технических мероприятий по снижению риска до заданной величины.

Концептуальная основа анализа техногенного риска может быть представлена в виде блок-схемы, изображенной на рис. 2.9.

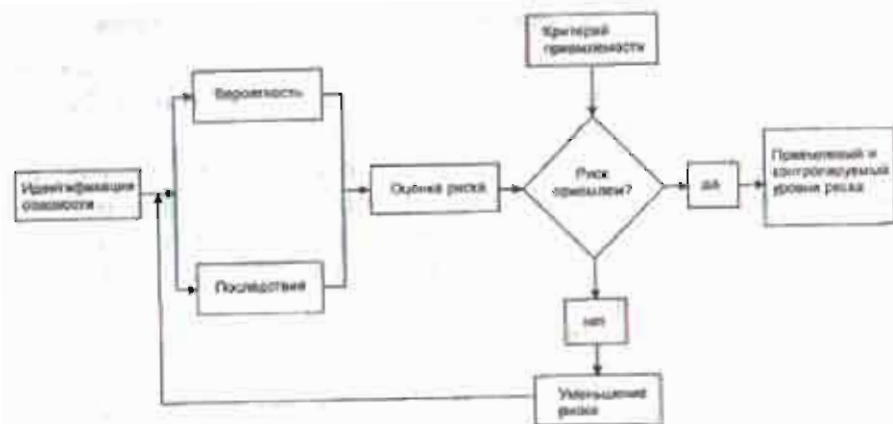


Рис. 2.9. Блок-схема анализа техногенного риска

2.12. Методы снижения аварийного риска

Снижение риска может идти по нескольким направлениям [11]:

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 примера можно привести 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.* 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. Например, использование дренажных систем, защитных ограждений, водяных завес и т.п.

3. *Уменьшение масштабов поражения.* В первую очередь речь идет о поражении людей (технического персонала и населения). При этом важными 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, частичное изменение общего эффекта поражения, например, за счет готовности оказать экстренную медицинскую помощь пострадавшим.

4. *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.

2.13. «Дерево отказов»

«Дерево отказов» («дерево аварий») представляет собой сложную графологическую структуру, лежащую в основе словесно-графического способа анализа возникновения аварии из последовательностей и комбинаций неисправностей и отказов элементов системы.

С помощью анализа «дерева отказов» фактически делается попытка количественно выразить риск дедуктивным методом. «Деревья отказов» идентифицируют событие или ситуацию, создающие риск, после чего ставится вопрос: как могло возникнуть такое событие? Ответ заключается в том, что к такому событию могло привести множество путей.

Пример «дерева отказов», используемого для анализа причин возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации емкостного оборудования, приведен на рис. 2.10. Структура «дерева отказов» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи. Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий. Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

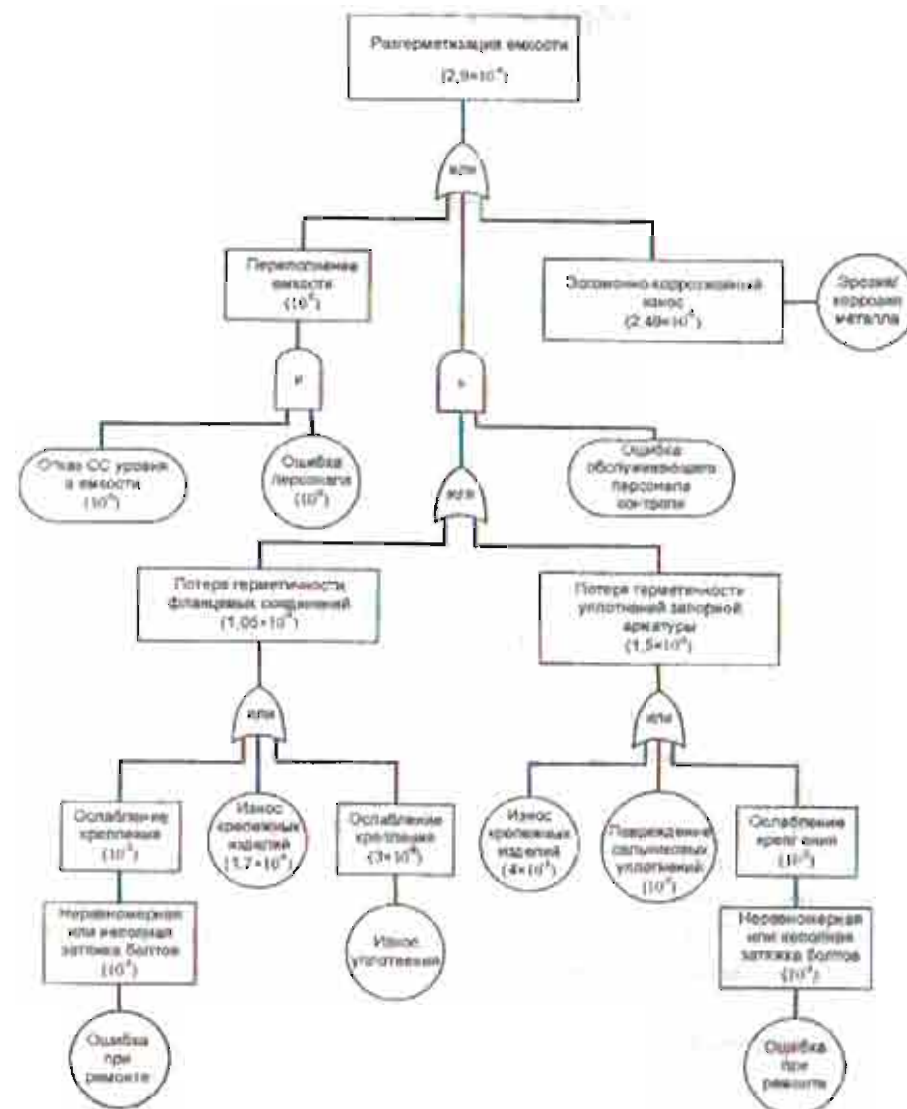


Рис. 2.10. «Дерево отказов» для емкостного оборудования [3]

Символ «И» изображается в виде



Символ «ИЛИ» изображается в виде



Результирующее событие, наступающее в результате конкретной комбинации неисправностей на входе логической схемы, изображается в виде прямоугольника.

Событие, означающее первичный отказ, изображается в виде кружка.

Первичный отказ элемента определяют как нерабочее состояние этого элемента, причиной которого является он сам. Для возвращения элемента в рабочее состояние необходимо выполнить ремонтные работы. Первичные отказы происходят при входных воздействиях, значение которых находится в пределах, лежащих в расчетном диапазоне, а отказы объясняются естественным старением элементов. Вероятность первичного отказа определяется из формул теории надежности.

При расчете вероятности возникновения аварии необходимо учитывать применяемые логические символы. Вероятность $P(A)$ выходного события A при независимости входных событий $A_1, A_2, \dots, A_n$ определяют по следующим формулам:

– при знаке «И»

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i); \quad (2.61)$$

– при знаке «ИЛИ»

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)], \quad (2.62)$$

где $P(A_i)$ – вероятность события A_i .

Обозначим исходные события «дерева отказов», представленного на рис. 2.10, цифрами (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Исходные события «дерева отказов»

№ п/п	Событие или состояние модели	Вероятность события 1/год
1	Ошибка при ремонте	0,01
2	Износ крепежных изделий фланцевого соединения	0,00017
3	Износ уплотнения фланцевого соединения	0,0003
4	Износ крепежных изделий запорной арматуры	0,004
5	Повреждение сальниковых уплотнений запорной арматуры	0,001
6	Ошибка при ремонте	0,01
7	Отказ системы сигнализации уровня в емкости	0,0001
8	Ошибка персонала	0,01
9	Ошибка обслуживающего персонала контроля	0,01
10	Эрозия/коррозия металла	0,0000249

Качественный анализ «дерева отказов» заключается в определении аварийных сочетаний.

Аварийное сочетание – это определенный набор исходных событий, одновременное возникновение которых гарантирует появление конечного события.

Минимальное аварийное сочетание – это такое сочетание, в котором при удалении любого исходного события оставшиеся события вместе больше не являются аварийным сочетанием. Аварийное сочетание, включающее другие сочетания, не является минимальным аварийным сочетанием.

Анализ «дерева отказов» позволяет выделить ветви прохождения сигнала к головному событию (в нашем случае на рис. 6.1 их три), а также указать связанные с ним минимальные пропускные сочетания, минимальные отсечные сочетания.

Минимальные пропускные сочетания – это набор исходных событий-предпосылок (отмечены в табл. 2.8 цифрами), обязательное (одновременное) возникновение которых достаточно для появления головного события (аварии). Для «дерева отказов» (см. на рис. 2.10) такими событиями и (или) сочетаниями являются: (10), (1×9), (2×9), (3×9), (4×9), (5×9), (6×9), (7×8). Минимальные пропускные сочетания используются главным образом для выявления «слабых» мест.

Минимальные отсечные сочетания – набор исходных событий, который гарантирует отсутствие головного события при условии невозникновения ни одного из составляющих этот набор событий: (1×2×3×4×5×6×7×10), (1×2×3×4×5×6×8×10), (7×9×10), (8×9×10). Используются главным образом для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии.

2.14. «Дерево событий»

«Дерево событий» – алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации). Используется для анализа условий развития аварийной ситуации (сценариев аварий), в том числе оценки вероятности реализации поражающих факторов.

Пример использования метода «дерева событий» для оценки вероятности реализации различных сценариев аварий приведен на рис. 2.11.

«Дерево событий» обычно рисуется слева направо и начинается с исходного события. Этим исходным событием является любое событие, которое приводит к отказу какой-либо системы. В «дереве событий» исходные события связаны со всеми другими возможными событиями «ветвями», а каждый сценарий представляет собой путь развития аварии, состоящий из набора таких разветвлений.

На рис. 2.11 цифры рядом с наименованием события показывают условную вероятность возникновения этого события. При этом вероятность возникновения инициирующего события (разгерметизация резервуара с СУГ) принята равной единице. Значение частоты возникновения отдельного события или сценария пересчитывается путем умножения частоты возникновения инициирующего события на условную вероятность конечного события.

Определив все исходные события и организовав их в логической последовательности, можно получить большое число потенциальных сценариев аварии. С помощью анализа «дерева событий» можно определить пути развития аварии, которые вносят наибольший вклад в риск из-за их высокой вероятности или потенциального ущерба.

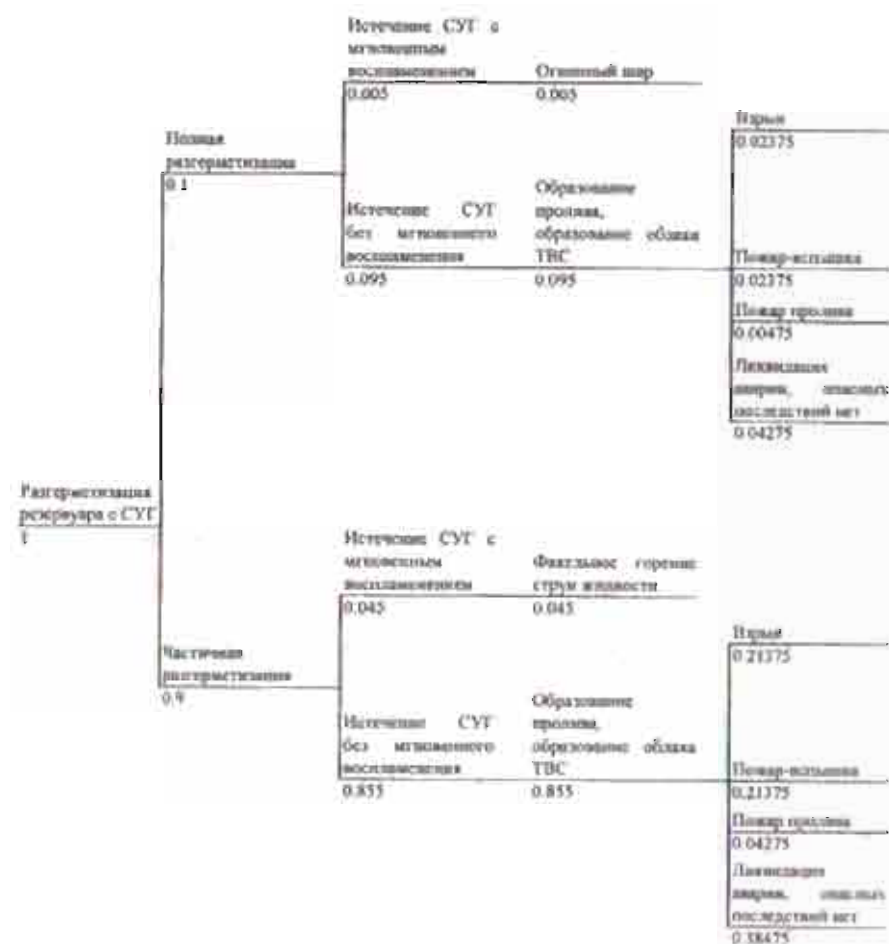


Рис. 2.11. Пример «дерева событий» при разгерметизации резервуара со сжиженным углеводородным газом (СУГ)

2.15. Аварийное реагирование

Согласно статье 10 Федерального закона 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» организация, эксплуатирующая опасный производственный объект, обязана:

- планировать и осуществлять мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварий на опасном производственном объекте;
- заключать с профессиональными аварийно-спасательными службами или с профессиональными аварийно-спасательными формированиями договоры на обслуживание, а в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации, создавать собственные профессиональные аварийно-спасательные службы или профессиональные аварийно-спасательные формирования, а также нештатные аварийно-спасательные формирования из числа работников;
- иметь резервы финансовых средств и материальных ресурсов для локализации и ликвидации последствий аварий в соответствии с законодательством Российской Федерации;
- обучать работников действиям в случае аварии или инцидента на опасном производственном объекте;
- создавать системы наблюдения, оповещения, связи и поддержки действий в случае аварии и поддерживать указанные системы в пригодном к использованию состоянии.

Организации, в которых эксплуатируются объекты, отнесенные в соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» к категории опасных производственных объектов, создают нештатные аварийно-спасательные формирования (НАСФ).

НАСФ создаются организациями из числа своих работников. НАСФ представляют собой самостоятельные или

входящие в состав аварийно-спасательных служб структуры, созданные на нештатной основе, оснащенные специальной техникой, оборудованием, снаряжением, инструментом и материалами, подготовленные для проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ в чрезвычайных ситуациях.

Порядок действия при возникновении аварий, катастроф и стихийных бедствий определен в соответствующих планах по ликвидации аварий, планах оперативного пожаротушения, а также плане работы штаба ГО и ЧС.

При поступлении сообщения об обнаружении выброса опасного вещества из аппарата или трубопровода дежурный оператор, управляющий технологическим участком, обязан:

- действуя в соответствии с планом оповещения, оповестить должностные лица эксплуатирующей организации
- действуя в соответствии с планом ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС), закрыть необходимые задвижки;
- направить к месту аварии НАСФ и контролировать его действия;
- приступить к выяснению причины аварии;
- передать руководство операцией по ликвидации аварии ответственным лицам организации, прибывшим к месту аварии.

Порядок действий персонала по локализации и ликвидации аварийных ситуаций изложен в оперативной части плана ликвидации аварийных ситуаций.

2.16. Нормативное регулирование безопасности и риска

Декларирование промышленной безопасности. С 1997 года в Российской Федерации законодательно установлена и действует процедура декларирования промышленной безопасности опасных производственных объектов.

В соответствии с требованиями Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных

объектов» №116-ФЗ разработка декларации промышленной безопасности (ДПБ) ОПО предполагает: идентификацию опасности и всестороннюю оценку риска аварии; анализ достаточности принятых мер по предупреждению аварий, обеспечению готовности организации к эксплуатации опасного производственного объекта в соответствии с требованиями промышленной безопасности; разработку мероприятий, направленных на снижение масштаба последствий аварии и размера ущерба, нанесенного в случае аварии на опасном производственном объекте.

Основная цель декларирования промышленной безопасности – информирование (эксплуатирующей организацией или заказчиком проекта, застройщиком, владельцем объекта) исполнительных органов власти (в том числе надзорных органов), общества и населения о рисках крупных аварий и безопасности ОПО. Декларация промышленной безопасности (далее – декларация) регистрируется и рассматривается федеральным органом по промышленному надзору, который утверждает заключение независимой экспертизы декларации.

Объектами декларирования являются только те ОПО, на которых количество опасных веществ превышает законодательно установленные пороговые значения, приведенные в приложении 2 к федеральному закону №116-ФЗ.

Требования к размещению промышленного объекта. При размещении промышленного объекта должны учитываться возможные отрицательные воздействия на окружающую среду и население. Законодательно устанавливается процедура получения разрешения на размещение промышленного объекта, обеспечивающая участие в ней государства, предпринимателя и общественности. Политика правильного размещения объекта применяется только к новым объектам. Что касается уже существующих, то она может быть направлена на ограничение

развития районов в непосредственной близости от промышленных объектов. В развитых странах, таких как Нидерланды, Бельгия, Япония, в определенных случаях правительство компенсирует населению затраты на переселение из особо техногенно-опасных регионов.

Лицензирование. Лицензирование является одним из основных механизмов регулирования промышленной безопасности и техногенного риска. Лицензии выдаются федеральным органом исполнительной власти, специально уполномоченным в области промышленной безопасности, и являются официальным документом, удостоверяющим право владельца на проведение определенного вида деятельности. Для получения лицензии на эксплуатацию ОПО заявитель должен предоставить акт приемки этого объекта в эксплуатацию или положительное заключение экспертизы промышленной безопасности, а также декларацию промышленной безопасности опасного производственного объекта.

Экспертиза промышленной безопасности. Одним из обязательных условий принятия решения о начале строительства, расширения, реконструкции, технического перевооружения, консервации и ликвидации опасного производственного объекта является наличие положительного заключения экспертизы промышленной безопасности проектной документации, утвержденного федеральным органом исполнительной власти в области промышленной безопасности или его территориальным органом.

В процессе приемки в эксплуатацию опасного производственного объекта проверяются соответствие опасного производственного объекта проектной документации, готовность организации к эксплуатации опасного производственного объекта и к действиям по локализации и ликвидации последствий аварий.

Кроме проектной документации объектами экспертизы также могут стать:

- технические устройства, применяемые на опасном производственном объекте;
- здания и сооружения на опасном производственном объекте;
- декларация промышленной безопасности и иные документы, связанные с эксплуатацией опасного производственного объекта.

Результатом осуществления экспертизы промышленной безопасности является заключение.

Государственный контроль и надзор за промышленной безопасностью. В России Государственный надзор за соблюдением правил по безопасному ведению работ в отдельных отраслях промышленности и на некоторых объектах осуществляется Государственным комитетом РФ по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору (Госгортехнадзор РФ) и его местными органами.

Разработка планов по ликвидации аварий и локализации их последствий. Согласно закону №116-ФЗ организация, эксплуатирующая опасный производственный объект, обязана планировать и осуществлять мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварий на опасном производственном объекте.

Планы локализации и ликвидации аварийных ситуаций разрабатываются в целях:

- определения возможных сценариев возникновения аварийных ситуаций и их развития;
- определения готовности организации к локализации и ликвидации аварийных ситуаций на опасном производственном объекте;
- планирования действий производственного персонала и аварийно-спасательных служб (формирований) по

локализации и ликвидации аварийных ситуаций на соответствующих стадиях их развития;

- разработки мероприятий, направленных на повышение противоаварийной защиты и снижение масштабов последствий аварий;

- выявления достаточности принятых мер по предупреждению аварийных ситуаций на объекте.

2.17. Принципы оценки экономического ущерба от промышленных аварий

В соответствии с РД 03-496-02 «Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах» величина ущерба от аварии включают следующие составляющие:

1) прямые потери – сумма потерь в результате уничтожения или повреждения оборудования, строений, транспортных средств, продукции и т.д.;

2) социально-экономические потери – затраты на компенсацию и проведение мероприятий вследствие гибели (травмирования) персонала и третьих лиц;

3) ущерб от выбытия трудовых ресурсов – ущерб государству, связанный с недополучением валового внутреннего продукта в результате гибели людей или потери ими трудоспособности;

4) косвенный ущерб – упущенная экономическая выгода и убытки, вызванные уплатой различных штрафов, неустоек, пенн и др.;

5) экологический ущерб – компенсация за сверхнормативное загрязнение окружающей среды;

6) затраты на локализацию (ликвидацию) аварии.

Прямые потери организации определяют как сумму потерь в результате уничтожения и повреждения основных фондов и товарно-материальных ценностей ($\Pi_{п.н.}$):

$$\Pi_{п.н.} = \sum_{i=1}^n (S_{oi} - (S_{mi} - S_{li})) + \sum_{j=1}^m \Pi_{ij} + \sum_{k=1}^l \Pi_{ck}, \quad (2.63)$$

где $\Pi_{п.н.}$ – прямые потери организации, руб.; n – число видов уничтоженных основных фондов; S_{oi} – остаточная стоимость i -го вида уничтоженных основных фондов, руб.; S_{mi} – стоимость материальных ценностей i -го вида, годных для дальнейшего использования, руб.; S_{li} – ликвидационная стоимость i -го вида уничтоженных основных фондов, руб.; m – число видов товара, уничтоженных при аварии; k – число видов сырья, уничтоженных при аварии; Π_{ij} – ущерб от уничтожения j -го вида продукции, изготавливаемой предприятием, руб.; Π_{ck} – ущерб от уничтожения k -го вида продукции, приобретаемой предприятием, руб.

Социально-экономические потери определяются в соответствии с Федеральным законом «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» от 24.07.98г. № 125-ФЗ, который устанавливает в Российской Федерации правовые, экономические и организационные основы обязательного социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний, определяет порядок возмещения вреда, причиненного жизни и здоровью работника при исполнении им обязанностей по трудовому договору. Для реализации указанного закона Фонд социального страхования ежегодно уведомляет предприятие о размере страховых взносов на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.

Потери от выбытия трудовых ресурсов определяются из расчета регионального дохода в среднем по промышленности.

Ущерб, причиненный окружающей природной среде и третьим лицам, компенсируется в соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97г. № 116-ФЗ, который предписывает организациям, эксплуатирующим опасный производственный объект, страховать ответственность за

причинение вреда жизни, здоровью или имуществу других лиц и окружающей природной среде в случае аварии.

Для оценки величины экологического ущерба используются следующие нормативные документы:

1) «Методика определения предотвращенного экологического ущерба» (утв. Председателем Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды от 30.11.1999 г.);

2) РД 03-496-02 «Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах»;

3) Постановление Правительства РФ от 12.06.03 г. № 344 «О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, размещение отходов производства и потребления».

В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» ущерб, причиненный окружающей природной среде, возмещается страховыми компаниями в рамках действующей в России системы обязательного страхования.

Плата взимается за следующие виды вредного воздействия:

- выброс в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников;
- выброс загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты;
- загрязнение почвы.

Плата при сверхлимитном загрязнении, которое, как правило, реализуется при авариях, определяется путем умножения соответствующих ставок платы за загрязнение в пределах установленных лимитов на величину превышения фактической массы выбросов над установленными лимитами, суммирования по видам загрязнения и умножения этих сумм на пятикратный повышающий коэффициент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов [и др.]. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.
2. Алымов В.Т. Анализ техногенного риска: учебное пособие для студентов вузов – М.: Круглый год, 2000. – 160 с.
3. Анализ риска объектов химического профиля на основе информации о техническом состоянии оборудования / А.Г. Хлуденев [и др.]. // Безопасность труда в промышленности. – 2006. – №3. – С. 28-33.
4. Баратов А.Н., Пчелинцев В.А. Пожарная безопасность: учебное пособие – М.: Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2006. – 144 с.
5. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
6. Галеев А.Д. Образование и распространение облаков тяжелых газов при авариях на объектах химической и нефтехимической промышленности: дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2006. – 227с.
7. ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
8. Иванов А.В. Разработка методических основ оценки последствий химических промышленных аварий (на примере металлургического комбината): дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1999. – 283 с.
9. Мартынюк В.Ф. Защита окружающей среды в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие для вузов. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 336 с.
10. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 671 с.

11. Меньшиков В.В., Швыряев А.А. Опасные химические объекты и техногенный риск: учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – 254 с.

12. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси-2.2», утв. НТЦ «Промышленная безопасность», согл. Госгортехнадзором России) // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сборник документов. Сер. 27. Вып. 2. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. – 208 с.

13. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеяния тяжелого газа / А.А. Шаталов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №9. – с. 46-52.

14. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов РД 03-418-01 (утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 10.07.01, № 30).

15. Моделирование пожаров и взрывов/ Под. ред. Н.Н.Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Изд-во «Пожнаука», 2000. – 492 с.

16. НПБ 105-03 Нормы пожарной безопасности «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»

17. О новом порядке оформления декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов/ М.В. Лисанов, В.В. Лисанов, Симакин // Безопасность труда в промышленности. – 2006. – № 3. – С. 37-39.

18. Основные показатели риска в терминах теории вероятностей/ А.И. Гражданкин [и др.]. // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – №7. – С. 35-39.

19. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высш. школа, 2003. – 463 с.

20. Лисанов М.В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №5. – С. 11-14.

21. Оценка риска аварий на объектах хранения и перевалки нефти и нефтепродуктов / А.В. Пчельников [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №6. – С. 33-37.

22. ПБ 09-540-03 «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств».

23. РД-03-26-2007.Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.12.07, № 859).

24. РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах (утв. постановлением Госгортехнадзора России от 29.10.02, № 63).

25. РД 09-398-01. Методические рекомендации по классификации аварий и инцидентов на опасных производственных объектах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности (утв. приказом Госгортехнадзора России от 31.01.01, №7).

26. Бондарь В.А., Попов Ю.П. Риск, надежность и безопасность. Система понятий и обозначений // Безопасность труда в промышленности. – 1997. – №10. – С. 39-42.

27. Сафонов В., Одишария Г., Швыряев А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М.: НУМЦ Минприроды России, 1996.

28. Сборник задач по теории надежности / под ред. А.М. Половко, И.М. Маликова. – М.: Советское радио, 1972. – 408 с.

29. Селезнев В.Е., Клишин Г.С., Алешин В.В. Математический анализ газовой опасности при выбросах природного газа // Инженерная экология. – 2000. – №5 – С. 29-36.

30. Britter R. E. Atmospheric dispersion of dense gases // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1989. – V. 21. – P. 317-344.

31. Sharan M., Yadav A. K., Singh M. P. Comparison of sigma schemes for estimation of air pollutant dispersion in low winds // Atmospheric environment. – 1995. – V. 29. – №16. – P. 2051-2059.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРИМЕР

Оценка риска аварий на объекте хранения сжиженных газов

Данные для расчета

Резервуар расположен на территории резервуарного парка склада сжиженных газов и имеет объем 600 м^3 . Площадь, занимаемая резервуарным парком и ограниченная обвалованием, равна 900 м^2 . Количество резервуаров 4. Степень заполнения резервуара 80 % (по объему). Температура 38°C . Численность персонала, обслуживающего склад, 15 чел. Режим работы трехсменный. С одной стороны склада от его внешней границы расположена территория садово-дачных участков с плотностью заселения 200 чел/км^2 . Далее находится жилая зона с плотностью заселения 2000 чел/км^2 (рис. П.1). Анализ статистики аварий показал, что вероятность разгерметизации резервуара составляет $P(A)=1 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$. Произвести расчет потенциального, коллективного и среднего индивидуального риска

Расчет

Исходные данные для расчета представлены в табл. П.1.

Таблица П.1

Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Плотность сжиженного газа $\rho_{\text{ж}}$, кг/м^3	558
Удельная теплоемкость жидкости $C_{\text{ж}}$, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	2390
Теплота испарения жидкости $\Delta H_{\text{исп}}$, Дж/кг	380000
Температура кипения жидкости при атмосферном давлении, $^\circ\text{C}$	-0,5
Молярная масса, кг/кмоль	58
Атмосферное давление P_0 , Па	101325
Коэффициент теплопроводности материала твердой поверхности $\lambda_{\text{т}}$, $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	1,42

Параметр	Значение
Плотность материала твердой поверхности $\rho_{\text{т}}$, кг/м ³	2220
Удельная теплоемкость материала твердой поверхности $C_{\text{т}}$, Дж/(кг·К)	770
Теплота сгорания горючего газа, кДж/кг	45800

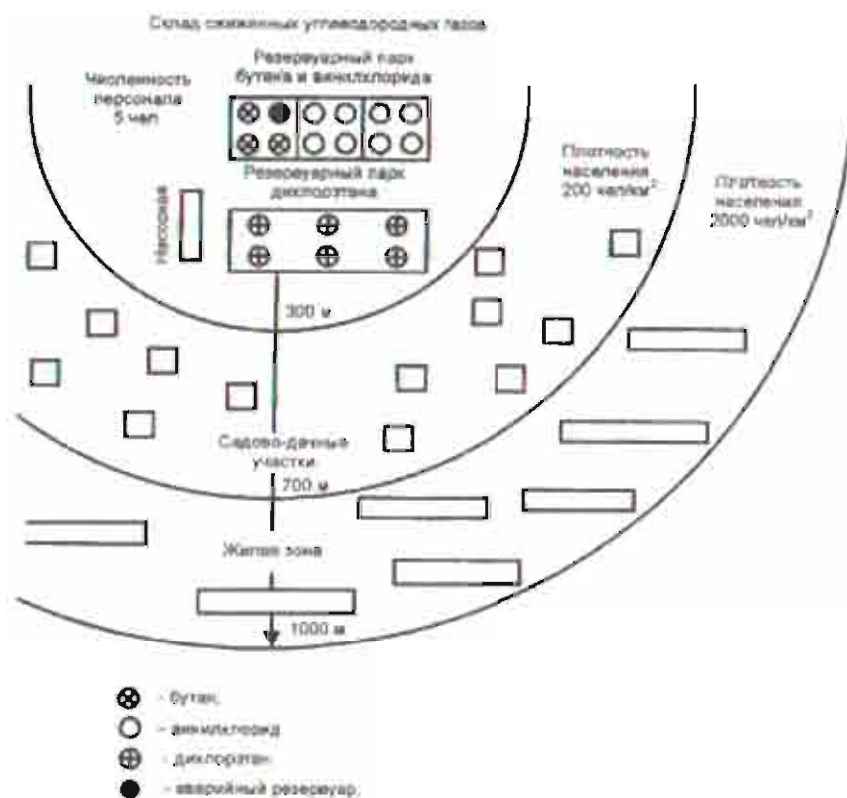


Рис. П.1 Схема территории склада и прилегающей к нему местности

ситуации (взрыв, огненный шар и пожар пролива при полной разгерметизации резервуара).

Используя «дерево событий», представленное на рис. 2.11, и учитывая количество резервуаров, определим вероятности сценариев аварий

Вероятность сгорания паровоздушной смеси в открытом пространстве с образованием волны избыточного давления:

$$P_{\text{в}} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,02375 = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Вероятность образования огненного шара:

$$P_{\text{ог}} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,005 = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Вероятность воспламенения пролива:

$$P_{\text{п.ж}} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,00475 = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Расчет количества опасного вещества, участвующего в аварии (производится по формулам, приведенным в разделе 4.1)

Масса жидкости в оборудовании:

$$m_{\text{ж}} = \alpha \cdot V \cdot \rho_{\text{ж}} = 0,8 \cdot 600 \cdot 558 = 267840 \text{ кг}.$$

Количество газа, участвующего в образовании взрывоопасной смеси

$$m = G_{\text{ж.г}} + G_{\text{ж}} + G_{\text{св}} + G' + G''.$$

Количество вещества, содержащееся в оборудовании в виде парогазовой смеси:

$$G_{\text{ж.г}} = (1 - \alpha) \frac{M}{R} \frac{P \cdot V}{273 + t},$$

где давление P равно давлению насыщенных паров над поверхностью жидкости.

Давление насыщенных паров может определяться по формуле

$$P_{\text{ж}} = 101325 \cdot \exp\left(\frac{380000 \cdot 58}{8310} \left(\frac{1}{272,5} - \frac{1}{311}\right)\right) = 338057 \text{ Па.}$$

Отсюда

$$G_{\text{ж}} = (1 - 0,8) \frac{58}{8310} \frac{338057 \cdot 600}{273 + 38} = 910 \text{ кг.}$$

Количество жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования:

$$G_{\text{ж.т}} = 267840 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{2390 \cdot (38,5 + 38,5)}{2 \cdot 380000}\right)\right) = 57601 \text{ кг.}$$

Количество вещества, переходящего в паровоздушное облако в виде аэрозолей:

$$G_{\text{ж}} = 57601 \text{ кг.}$$

Оставшаяся после мгновенного вскипания жидкая фаза разливается на подстилающей поверхности. Происходит ее испарение за счет теплообмена с грунтом и атмосферным потоком.

Количество паров, образующихся за счет теплоотдачи от твердой поверхности:

$$G^* = 2 \frac{311 - 272,5}{380000} \cdot \sqrt{\frac{1,42 \cdot 2220 \cdot 770}{3,14}} \cdot 900 \cdot \sqrt{3600} = 77714 \text{ кг.}$$

Количество паров, образующихся за счет теплообмена с окружающим воздухом и диффузионных процессов:

$$G' = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{58 \cdot 338,057 \cdot 900 \cdot 3600} = 8341 \text{ кг.}$$

Количество сжиженного газа, переходящего в пар:

$$m = 910 + 57601 + 57601 + 77714 + 8341 = 202167 \text{ кг.}$$

Расчет параметров поражающих факторов

Вычисляем интенсивности теплового излучения огненного шара $q_{0.ш}$ и пожара пролива $q_{0.п.}$, а также избыточное давление ΔP и импульс i при взрыве паровоздушной смеси на различных расстояниях от резервуара по формулам, приведенным в разделе 2.4.4. Для полученных значений поражающих факторов по формулам (2.52) и (2.53) рассчитываем пробит-функции. По табл. П.2 определяем условные вероятности поражения человека ударной волной $P_{L.ш}$, тепловым излучением от огненного шара $P_{L.0.ш}$ и от пожара пролива $P_{L.п.}$. Результаты расчетов представлены в табл. П.3.

Таблица П.2
Таблица значений условной вероятности поражения в зависимости от P_r [16]

Условная вероят- ность пораже- ния, %	Величина P_T									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,90	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
-	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Таблица П.3
Результаты расчетов значений поражающих факторов

Рас- стояние r , м	Огненный шар		Пожар пролива				Взрыв			
	$Q_{0,ш}$, кВт/м ²	P_r	$P_{1,0,ш}$ $\times 10^2$	$q_{п,п}$, кВт/м ²	P_r	$P_{1,п,п}$ $\times 10^2$	ΔP , кПа	i , Па·с	P_r	$P_{L,в}$, $\times 10^2$
50	107,8	10,52	100	3,72	-3,50	0	1307	7879	12,98	100
100	95,66	10,11	100	0,67	-9,34	0	246,2	3939	10,74	100
200	63,68	8,72	100	0,09	-16,26	0	60,1	1969	7,69	99,64
300	38,06	6,97	95,3	0,02	-20,59	0	29,9	1313	6,17	87,6
400	22,34	5,16	56,33	0,0097	-23,75	0	19,1	984,9	5,19	47,5
500	13,41	3,42	5,78	0,0046	-26,26	0	13,9	787,9	4,49	30,5
600	8,33	1,80	0	0,0025	-28,37	0	10,8	656,6	3,95	14,55
700	5,36	0,30	0	0,0015	-30,18	0	8,8	562,8	3,50	6,7
800	3,56	-1,09	0	0,0009	-31,78	0	7,4	492,5	3,13	3
900	2,44	-2,38	0	0,0006	-33,23	0	6,4	437,7	2,81	1,5
1000	1,71	-3,58	0	0,0004	-34,54	0	5,6	394,0	2,53	1

Расчет показателей риска

Потенциальный риск:

$$RI = P_{ав} \cdot P_{лос} + P_{нл} \cdot P_{лос} + P_{ж} \cdot P_{лс}$$

Средний индивидуальный риск:

$$R = \frac{\sum_{x,y} RI \cdot N(x,y)}{\sum_{x,y} N(x,y)},$$

где $N(x,y)$ – численность людей в ячейке (единичной площадке) с координатами (x, y) .

Коллективный риск:

$$RN = \bar{R} \cdot N,$$

где N – суммарное количество людей, подверженных риску поражения при аварии.

Для расчета проведем деление территории на три зоны:

- зона А – территория склада (количество человек, постоянно пребывающих в зоне А, – 5 человек);
- зона Б – территория, занимаемая садово-дачными участками [количество человек, постоянно пребывающих в зоне Б, – $n^B = \rho^B \cdot S$, (где ρ^B – плотность заселения, S – площадь, занимаемая садово-дачными участками);
- зона В – территория, занимаемая жилой зоной (количество человек, постоянно пребывающих в зоне В, – $n^B = \rho^B \cdot S$, (где ρ^B – плотность заселения, S – площадь жилой зоны).

Для большей точности расчета разбиваем территорию зон Б, В на подзоны (с II по VII), следующие одна за другой через каждые 100 м, и определяем число людей n^B , n^B , постоянно пребывающих в этих подзонах.

Результаты расчета показателей риска представлены в табл. П.4.

Таблица П.4

Результаты расчетов показателей риска

Зона	Под-зона	Рас-стояние, м	Потенциальный риск				Число человек в зоне	Средний индивидуальный риск, 1/год	Коллективный риск, чел/год
			$P_{ав} \cdot P_{лос} \cdot 10^6$, 1/год	$P_{нл} \cdot P_{лос} \cdot 10^6$, 1/год	$P_{ж} \cdot P_{лс} \cdot 10^6$, 1/год	$RI \cdot 10^6$, 1/год			
А	I	50	2,0	0	9,50	11,5	5	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$
		100	2,0	0	9,50	11,5			
		200	2,0	0	9,50	11,5			
		300	1,91	0	8,32	10,23			
Б	II	400	1,13	0	4,51	7,935	22	$3,313 \cdot 10^{-6}$	
	III	500	0,116	0	2,90	4,328	28		
	IV	600	0	0	1,38	2,198	34		
	V	700	0	0	0,637	1,0085	40		
	VI	800	0	0	0,285	0,461	471		
В	VII	900	0	0	0,143	0,214	534	$2,51 \cdot 10^{-7}$	
	VIII	1000	0	0	0,095	0,119	596		

*Средние по подзонам значения потенциального риска

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

А.Д. Галеев, С.И. Поникаров

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

Редактор Л.И. Жадан

Лицензия № 020404 от 6.03.97 г.

Подписано в печать 04.05.09.

Бумага офсетная.

6,75 уч.-изд.л.

Печать Riso.

Тираж 100 экз.

Формат 60х84 1/16.

6,28 усл.печ.л.

Заказ 165 «С» 84.

Издательство Казанского государственного технологического университета

Офсетная лаборатория Казанского государственного
технологического университета

420015, Казань, К.Маркса, 68