

**Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М.,
Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И.**

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

Учебное пособие

Под общей редакцией М. И. Фалеева

Допущено Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений

Москва
Деловой экспресс
2002

УДК 62-192:504.1(075)

ББК 30.14я7

Н17

- Н17 **Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М.,
Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И.**
Надежность технических систем и техногенный риск. — М.:
ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002 — 368 с.

Учебное пособие подготовлено ведущими учеными и специалистами высшей школы и МЧС России в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки «Безопасность жизнедеятельности» и предназначено для студентов, обучающихся по специальностям «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», «Безопасность технологических процессов и производств», «Пожарная безопасность», «Защита в чрезвычайных ситуациях».

Системно рассмотрены характеристики опасностей, проблемы риска технологий, причины отказов технических систем, инженерные методы исследования надежности технических систем и обеспечения их безопасности, правовые и экономические аспекты управления безопасностью.

Материал будет полезен преподавателям и студентам технических специальностей вузов, преподавателям и слушателям учебно-методических центров управлений по делам ГО и ЧС, инженерно-техническим работникам, занимающимся вопросами обеспечения безопасности производств, студентам других специальностей, изучающим вопросы обеспечения надежности и безопасности технических систем.

Рецензенты: кафедра «Безопасность жизнедеятельности и промышленная экология» Государственного индустриального университета (зав. кафедрой профессор Резников Е. А.); доктор технических наук, профессор Прусенко Б. Е. (Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губина).

Учебное пособие подготовлено при финансовой поддержке МЧС России.

ISBN 5-89644-078-2

© Авторы, 2002

© МЧС России, 2002

© Оформление «Деловой экспресс», 2002

С О Д Е Р Ж А Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	10

ГЛАВА 1

Природа и характеристика опасностей в техносфере	19

1.1. Техносфера. Техника. Техническая система. Технология	19
1.2. Определение опасности	21
1.3. Аксиомы о потенциальной опасности технических систем	22
1.4. Таксономия опасностей	23
1.4.1. Примеры таксономий	25
1.5. Алгоритм развития опасности и ее реализации	31
1.6. Источники опасности	32
1.7. Энергоэнтропийная концепция опасностей	33
1.8. Номенклатура опасностей	33
1.9. Квантификация опасностей	34
1.10. Идентификация опасностей	34
1.11. Причины и последствия	35
1.12. Пороговый уровень опасности	35
1.13. Показатели безопасности технических систем	37

ГЛАВА 2

Основные положения теории риска	38

2.1. Понятие риска	38
2.2. Развитие риска на промышленных объектах.	45
2.3. Основы методологии анализа и управления риском	47
2.3.1. Анализ риска: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем	47
2.3.2. Оценка риска: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем	50
2.3.3. Управление риском: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем	52

2.3.4. Общность и различие процедур оценки и управления риском	53
2.3.5. Количественные показатели риска	53
2.3.6. Приемлемый риск.	59
2.3.7. Сравнение рисков.	62
2.3.8. Системно-динамический подход к оценке техногенного риска	69
2.4. Моделирование риска.	79
2.5. Принципы построения информационных технологий управления риском	86

ГЛАВА 3

Роль внешних факторов, воздействующих на формирование отказов технических систем	89
3.1. Общие замечания	89
3.2. Классификация внешних воздействующих факторов	91
3.3. Воздействие температуры	95
3.4. Воздействие солнечной радиации	99
3.5. Воздействие влажности	101
3.6. Воздействие атмосферного давления	104
3.7. Воздействие ветра и гололеда	104
3.8. Воздействие примесей воздуха	107
3.9. Воздействие биологических факторов	109
3.10. Старение материалов	109
3.11. Факторы нагрузки	113

ГЛАВА 4

Основы теории расчета надежности технических систем	115
4.1. Основные понятия теории надежности.	116
4.1.1. Предварительные замечания	116
4.1.2. Объект, элемент, система	116
4.1.2.1. Состояние объекта	117
4.1.2.2. Переход объекта в различные состояния	119
4.1.2.3. Временные характеристики объекта	120
4.1.3. Определение надежности.	120
4.1.3.1. Показатели безотказности и ремонтпригодности	123
4.1.3.2. Показатели долговечности и сохраняемости	125
4.1.4. Виды надежности	126
4.1.5. Характеристики отказов	126

4.1.6. Виды отказов и причинные связи	128
4.2. Количественные характеристики надежности	131
4.2.1. Критерии и количественные характеристики надежности	131
4.2.1.2. Критерии надежности невосстанавливаемых объектов	132
4.2.1.3. Критерии надежности восстанавливаемых объектов	135
4.3. Теоретические законы распределения отказов	140
4.3.1. Случайное событие.	140
4.3.2. Случайная величина	141
4.3.3. Основные законы распределения, используемые в теории надежности	143
4.3.4. О выборе закона распределения отказов при расчете надежности.	151
4.4. Резервирование	151
4.4.1. Виды резервирования	152
4.4.2. Способы структурного резервирования.	152
4.5. Основы расчета надежности технических систем по надежности их элементов	155
4.5.1. Целевое назначение и классификация методов расчета. .	155
4.5.2. Последовательность расчета систем	156
4.5.3. Расчет надежности, основанный на использовании параллельно-последовательных структур	158
4.5.3.1. Система с последовательным соединением элементов.	158
4.5.3.2. Система с параллельным соединением элементов.	161
4.5.3.3. Способы преобразования сложных структур . . .	163
4.5.4. Надежность резервированной системы	167
4.5.4.1. Параллельное соединение резервного оборудования системы	167
4.5.4.2. Включение резервного оборудования системы замещением	168
4.5.4.3. Надежность резервированной системы в случае комбинаций отказов и внешних воздействий . . .	169
4.5.4.4. Анализ надежности систем при множественных отказах	170
4.5.4.5. Модель надежности системы с множественными отказами	177

ГЛАВА 5

Методика исследования надежности технических систем 181

- 5.1. Системный подход к анализу возможных отказов: понятие, назначение, цели и этапы, порядок, границы исследования . . 181
- 5.2. Выявление основных опасностей на ранних стадиях проектирования 186
- 5.3. Исследования в предпусковой период 187
- 5.4. Исследования действующих систем 187
- 5.5. Регистрация результатов исследования 188
- 5.6. Содержание информационного отчета по безопасности процесса 189
 - 5.6.1. Описание промышленной системы. 189
 - 5.6.2. Описание производственных процессов 189
 - 5.6.3. Описание опасных веществ 190
 - 5.6.4. Предварительный анализ опасностей. 190
 - 5.6.5. Описание элементов системы безопасности 190
 - 5.6.6. Оценка возможности развития опасностей 191
 - 5.6.7. Организация 191
 - 5.6.8. Оценка последствий крупных производственных аварий . 192
 - 5.6.9. Планирование мер смягчения последствий аварий 192
 - 5.6.10. Отчеты перед местными органами власти 193

ГЛАВА 6

Инженерные методы исследования безопасности технических систем 195

- 6.1. Понятие и методология качественного и количественного анализов опасностей и выявления отказов систем 195
- 6.2. Порядок определения причин отказов и нахождения аварийного события при анализе состояния системы. 198
- 6.3. Предварительный анализ опасностей. 199
- 6.4. Метод анализа опасности и работоспособности— АОР (Hazard and Operability Study — HAZOP) 201
- 6.5. Методы проверочного листа (Check-list) и «Что будет, если ...?» («What — If»). 208
- 6.6. Анализ вида и последствий отказа — АВПО (Failure Mode and Effects Analysis — FMEA) 214
- 6.7. Анализ вида, последствий и критичности отказа — АВПКО (Failure Mode, Effects and Critical Analysis — FMECA) 215
- 6.8. Дерево отказов — ДО (Fault Tree Analysis — FTA) 217
- 6.9. Дерево событий — ДС (Event Tree Analysis — ETA). 235

6.10. Дерево решений	238
6.11. Логический анализ	239
6.12. Контрольные карты процессов	242
6.13. Распознавание образов	245
6.14. Таблицы состояний и аварийных сочетаний	249

ГЛАВА 7

Оценка надежности человека как звена сложной технической системы. 253

7.1. Причины совершения ошибок	253
7.2. Методология прогнозирования ошибок	262
7.3. Принципы формирования баз об ошибках человека	264

ГЛАВА 8

Организация и проведение экспертизы технических систем 266

8.1. Причины, задачи и содержание экспертизы	266
8.2. Организация экспертизы.	267
8.3. Подбор экспертов	269
8.4. Экспертные оценки	272
8.5. Опрос экспертов	274
8.6. Оценка согласованности суждений экспертов	280
8.7. Групповая оценка и выбор предпочтительного решения	285
8.8. Принятие решения.	288
8.9. Работа на завершающем этапе	290

ГЛАВА 9

Мероприятия, методы и средства обеспечения надежности и безопасности технических систем 292

9.1. Стадия проектирования технических систем	292
9.2. Стадия изготовления технических систем	293
9.3. Стадия эксплуатации технических систем	293
9.4. Техническая поддержка и обеспечение.	294
9.5. Технические средства обеспечения надежности и безопасности технических систем	295
9.5.1. Средства предупреждения отказов	295
9.5.2. Средства контроля	296
9.5.3. Средства защиты	296
9.6. Организационно-управленческие мероприятия.	298

9.6.1. Техническое обслуживание, ремонтные работы и инспектирование	298
9.6.2. Управление изменениями в технологическом процессе. .	300
9.6.3. Обучение.	300
9.7. Диагностика нарушений и аварийных ситуаций в технических системах	301
9.8. Алгоритм обеспечения эксплуатационной надежности технических систем	308

ГЛАВА 10

Технические системы безопасности	310
10.1. Назначение и принципы работы защитных систем	310
10.2. Типовые структуры и принципы функционирования автоматических систем защиты	312
10.3. Автоматическая интеллектуализированная система защиты объекта и управления уровнем безопасности	317
10.4. Типовые локальные технические системы и средства безопасности	319
10.4.1. Системы предотвращения отклонений от допустимых рабочих режимов	320
10.4.2. Системы, предотвращающие разрушение деталей и узлов систем безопасности	321
10.4.3. Системы энергоснабжения	321
10.4.4. Системы аварийной сигнализации	321
10.4.5. Защитная автоматика	322
10.4.6. Технические средства защиты	322
10.4.7. Способы предотвращения человеческих и организационных ошибок.	322

ГЛАВА 11

Правовые аспекты анализа риска и управления промышленной безопасностью.	324
11.1. Классификация промышленных объектов по степени опасности.	326
11.2. Оценка опасности промышленного объекта.	326
11.3. Декларация безопасности опасного промышленного объекта .	327
11.4. Требования к размещению промышленного объекта	327
11.5. Система лицензирования	328
11.6. Экспертиза промышленной безопасности.	328

11.7. Информирование государственных органов и общественности об опасностях и авариях	328
11.8. Ответственность производителей или предпринимателей за нарушения законодательства и нанесенный ущерб	329
11.9. Учет и расследование	329
11.10. Участие органов местного самоуправления и общественности в процессах обеспечения промышленной безопасности . . .	330
11.11. Государственный контроль и надзор за промышленной безопасностью	330
11.12. Разработка планов по ликвидации аварий и локализации их последствий, а также планов по ликвидации чрезвычайных ситуаций	334
11.13. Экономические механизмы регулирования промышленной безопасности	334
11.14. Российское законодательство в области промышленной безопасности	335

ГЛАВА 12

Принципы оценки экономического ущерба от промышленных аварий 339

12.1. Понятие ущерба и вреда. Структура вреда	339
12.2. Экономический и экологический вред	340
12.3. Принципы оценки экономического ущерба	342

Приложение 1

Таблица значений функции $y = \exp(-x)$	347

Приложение 2

Значения гамма-функции	348

Приложение 3

Значение нормальной функции распределения $F(t) = 0,5 + \Phi(u)$. .	349

Приложение 4

Значения функции $F(x)$.	350

Приложение 5

Основные понятия, термины и определения	351

Библиографический список	362

ПРЕДИСЛОВИЕ

Безопасность и устойчивость развития общества — два взаимосвязанных понятия, имеющих определяющее значение при выборе ориентиров и путей достижения высокого материального и духовного уровней жизни людей.

Общее определение термина «безопасность» следует из Закона Российской Федерации «О безопасности», принятом 25 марта 1992 г. Под безопасностью понимается качественное состояние общества и государства, при котором обеспечивается защита каждого человека, проживающего на территории Российской Федерации, его прав и гражданских свобод, а также надежность существования и устойчивость развития Республики, защита ее ценностей, материальных и духовных источников жизнедеятельности, конституционного строя и государственного суверенитета, независимости и территориальной целостности от внутренних и внешних врагов.

Если подходить к проблеме промышленной безопасности именно с позиций настоящего определения, то становится очевидным, что она не ограничивается и не исчерпывается вопросами только научно-технического характера — проблема имеет огромное социально-экономическое значение в области обеспечения национальной безопасности России. Государство не может и не должно ежегодно нести колоссальные потери в виде человеческих жизней, существенного морального, материального и экологического ущерба. В настоящее время [13] частота возникновения чрезвычайных ситуаций в России с гибелью людей существенно (на порядок и более) превышает показатели развитых стран (см. рис. п1). Особенно это характерно для «мелких» происшествий на производстве, не ведущих к тяжелым последствиям, что достаточно распространено на отечественных предприятиях. Обычно они не привлекают к себе большого внимания общественности и специалистов аналогичных производств. Но каково приходится семьям, потерявшим кормильцев? Дети лишаются родителей, а государство — трудоспособных граждан.

В этом плане нельзя не отметить, что неудовлетворительное состояние дел в области обеспечения безопасности производства и надлежащих условий труда негативно влияет на общую продолжительность жизни людей и показатели смертности в Российской Федерации. В настоящее время доля трудоспособного населения от общего числа умерших достигла 30 %,

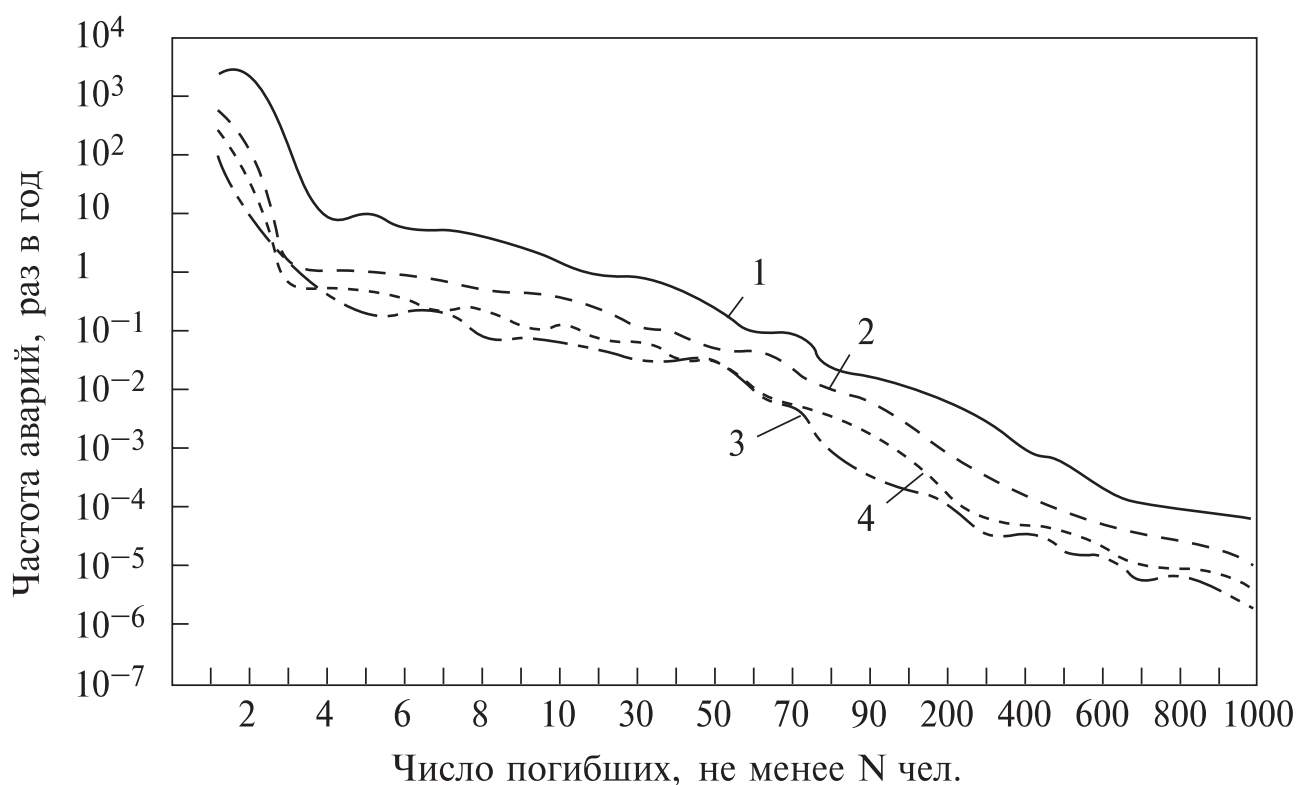


Рис. п1. Частота возникновения чрезвычайных ситуаций с гибелью людей:

1 — Россия; 2 — США; 3 — Великобритания; 4 — Нидерланды

в то время как в конце 80-х и начале 90-х годов она составляла от 20 до 26 % [62]. Динамика смертности населения приведена на рис. п2.

На рис. п3. изображена динамика риска гибели населения в целом по России в период 1970—1995 гг., полученная на основе медико-демографических данных [9]. Видно, что начиная с 1990 г. риск гибели населения вследствие внешних причин начал заметно увеличиваться. Эта тенденция резко выражена для мужского населения. Доля смертности от внешних причин для мужчин (от общей смертности) в 1994 году составила 59,3 %, соответственно, женщин — 20,9 %.

С 1987 по 1997 год на производстве пострадало 3 млн. 855 тыс. человек. С 1987 по 1999 год погибли 90 тыс. 969 человек. Динамика травматизма работающих со смертельным исходом (смертность выражена через коэффициент частоты смертности — $K_{см}$ — количество погибших на 1 тыс. работающих) приведена на рис. п4.

По числу травматизма со смертельным исходом Россия значительно выделяется среди экономически развитых стран [63], см. рис. п5.

Ежегодно в России 12—15 тыс. чел. становятся инвалидами в результате получения травм на производстве, а на учете ежегодно состоят свыше 220 тыс. человек, получающих пенсии по трудовому увечью и профзаболеваниям. Первичный выход на инвалидность в 1994 году составил 76 случаев на 10 тыс. работников. Динамика первичного выхода на инвалидность населения России приведена на рис. п6.

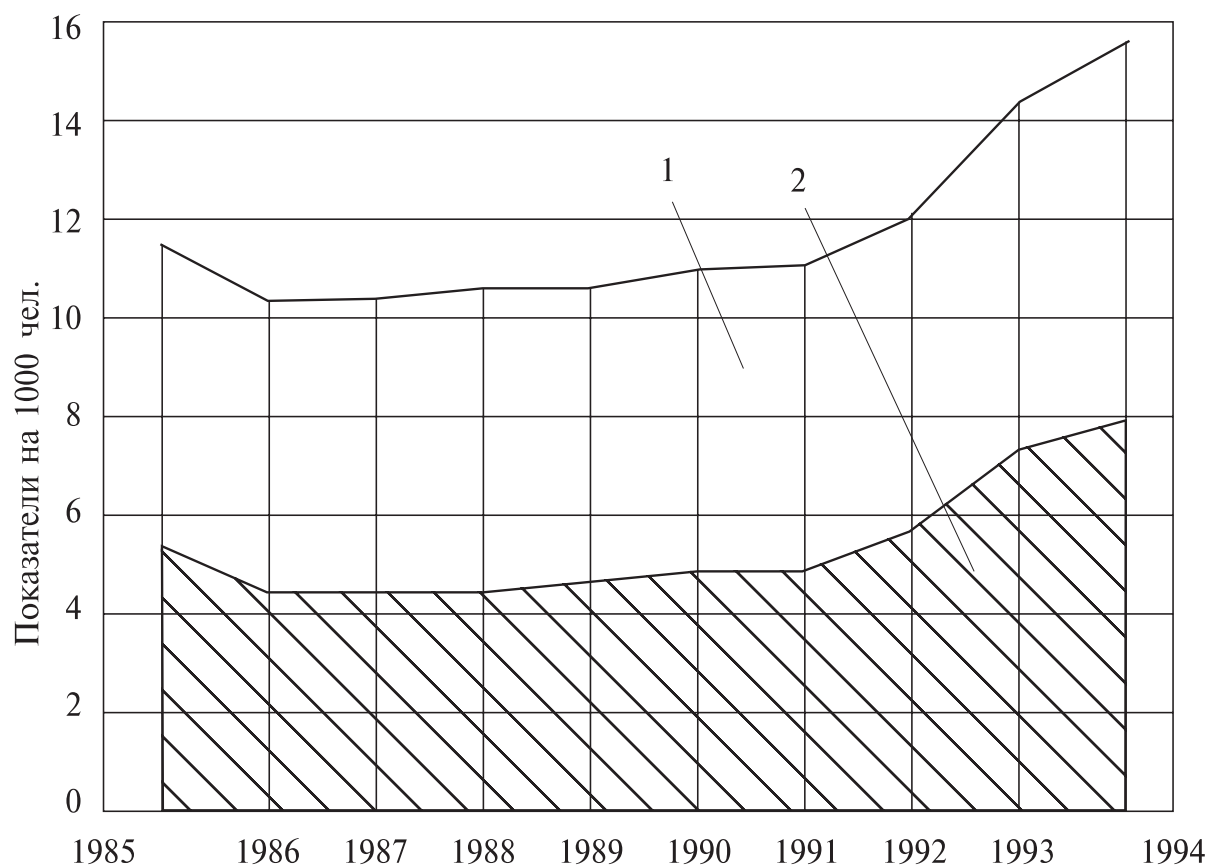


Рис. п2. Динамика смертности населения Российской Федерации:
1 — общая смертность; 2 — смертность в трудоспособном возрасте

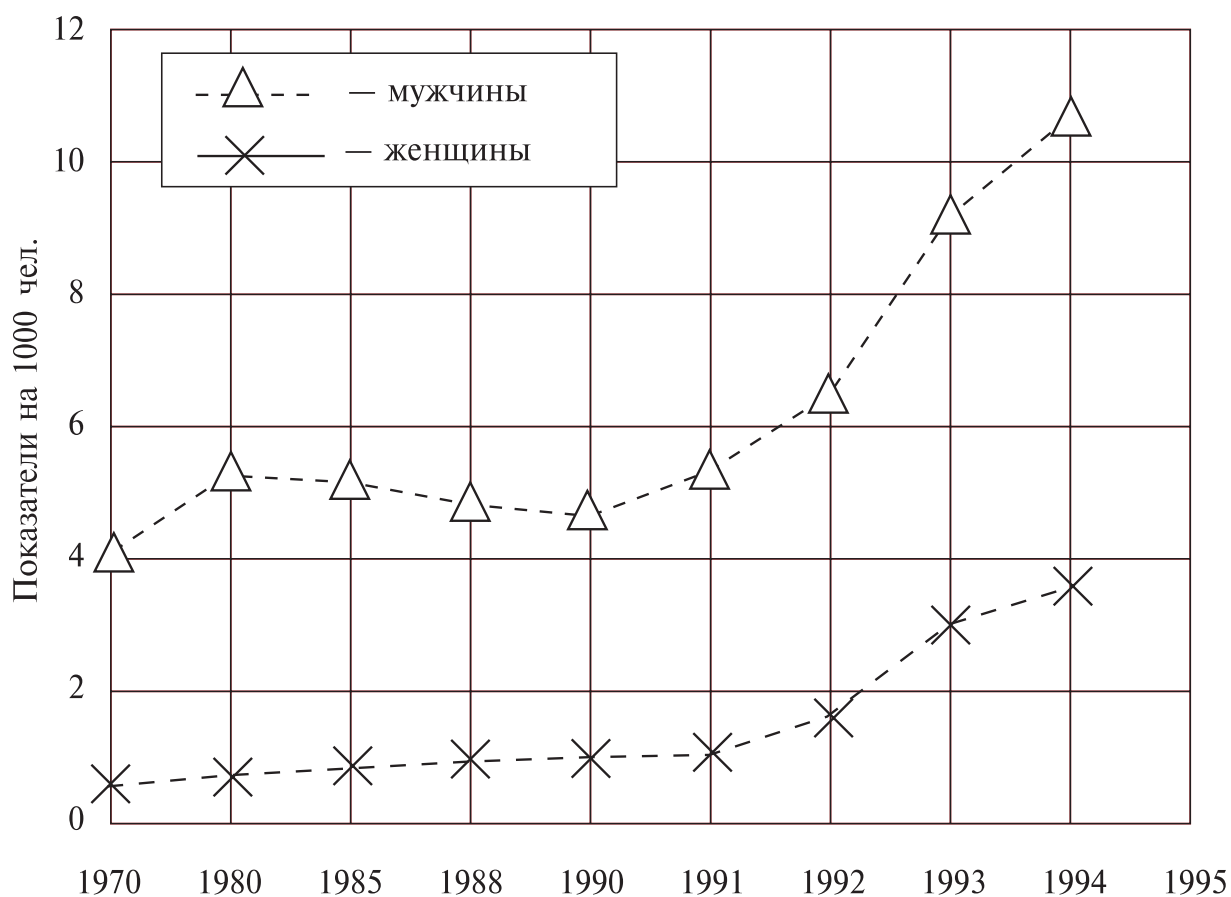


Рис. п3. Динамика смертности населения России от внешних причин

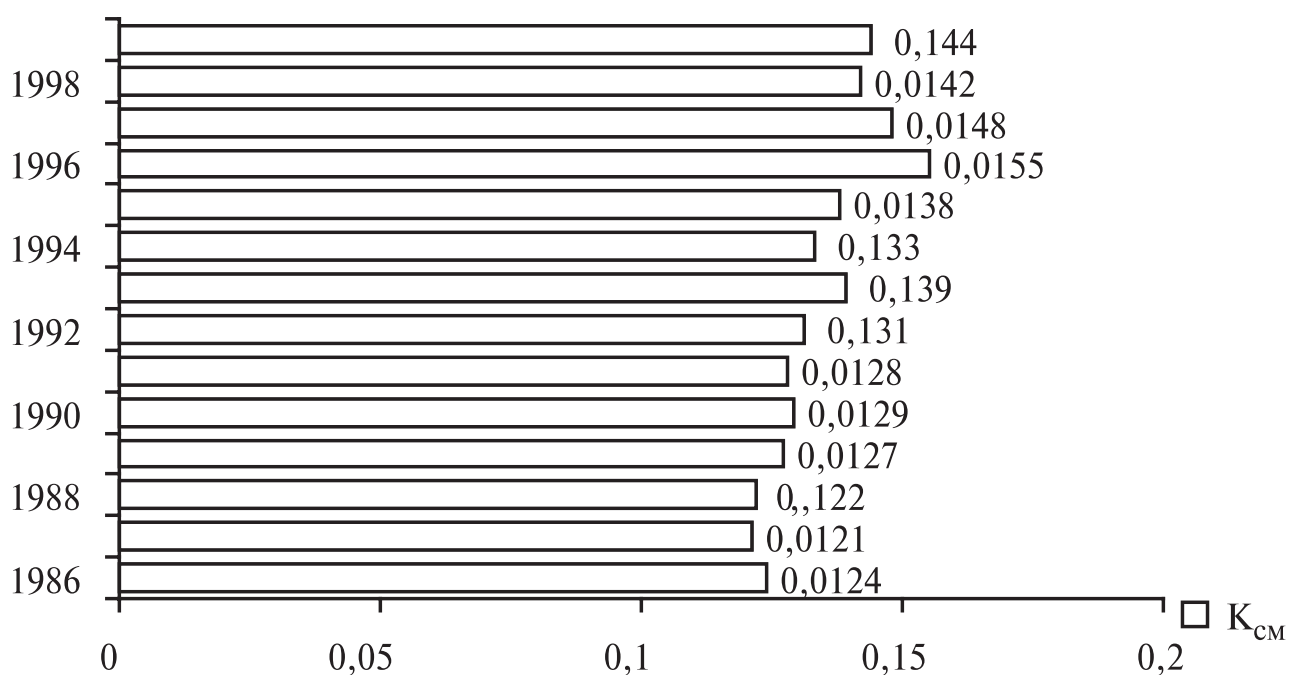


Рис. п4. Динамика травматизма со смертельным исходом на 1000 работающих

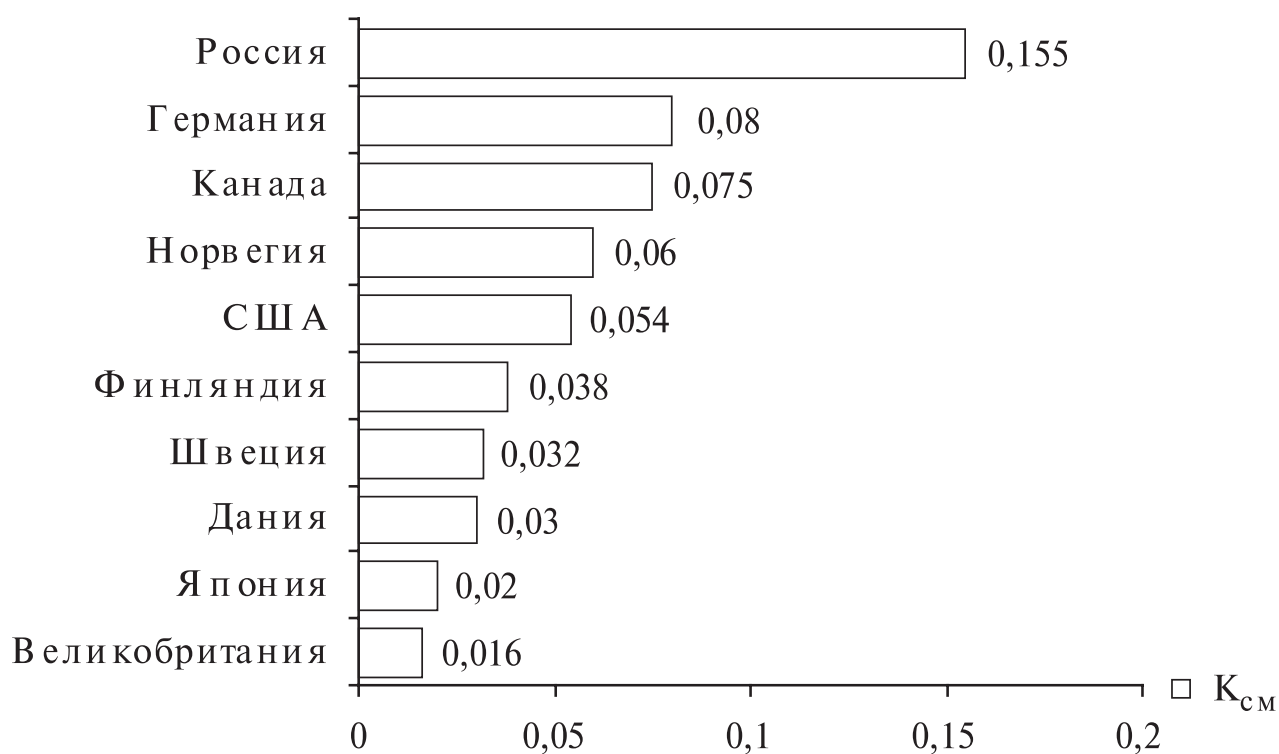


Рис. п5. Уровень травматизма со смертельным исходом в ряде экономически развитых стран

Всего в Российской Федерации сейчас 5,9 млн. инвалидов, что составляет три процента населения. Это означает: почти каждый тридцатый — инвалид. Воображение рисует жутковатые сравнения: почти вся Белоруссия или население Литвы и Латвии вместе взятых. Рост числа инвалидов сопровождается встречным сокращением населения страны. Если эти две встречные линии продолжают сближение, то могут достигнуть критической точки, где

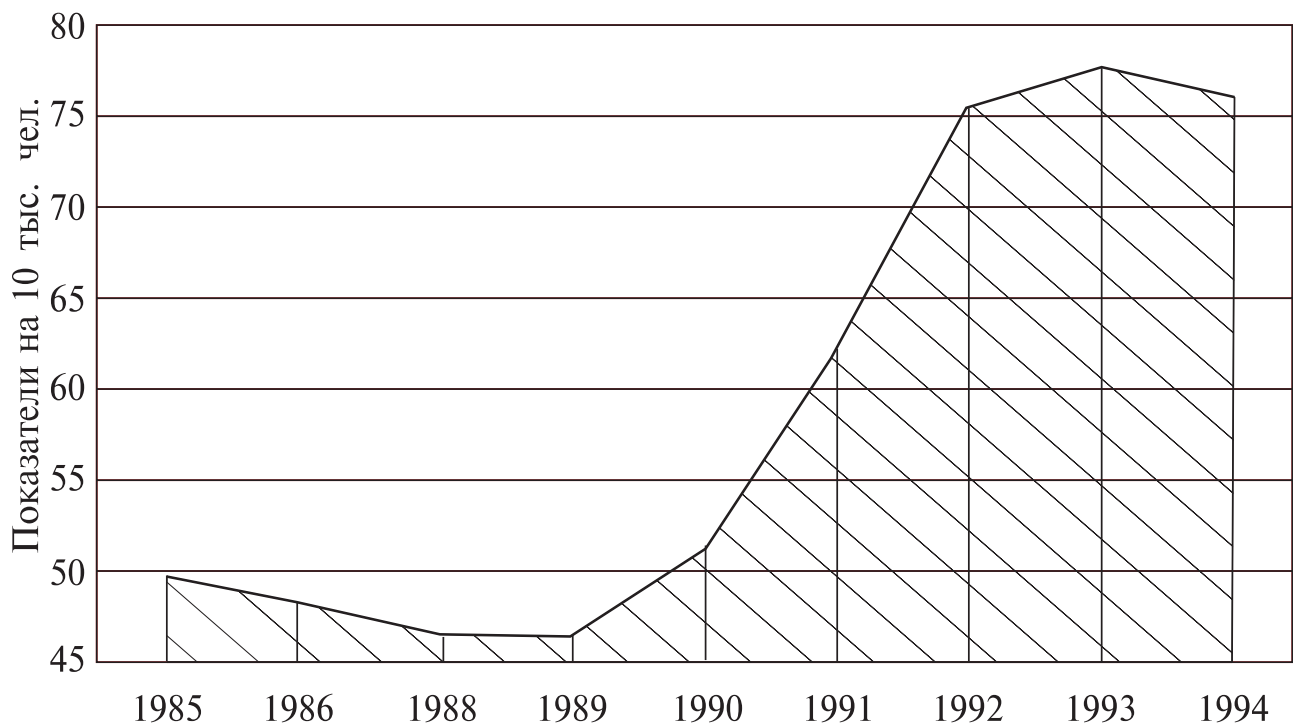


Рис. пб. Динамика первичного выхода на инвалидность

станет вопрос о существовании великой державы [3]. Основные виды заболеваний, вследствие которых устанавливается инвалидность: туберкулез легких, психические, сердечно-сосудистые заболевания, болезни системы кровообращения, органов дыхания, что отрицательно сказывается на общей демографической ситуации в Российской Федерации. Академик Л. И. Абалкин в одной из своих работ отмечает тот факт, что уже несколько лет идет процесс депопуляции населения России. Его сокращение не перекрывается даже притоком эмигрантов. Снижается средняя продолжительность жизни. По меркам развитых стран, пороговым значением считается сегодня продолжительность жизни 70 лет. Если существующий уровень опускается ниже, это свидетельствует, что генофонд общества находится под угрозой. В настоящее время средняя продолжительность жизни находится на уровне 65 лет. Особенно тревожно выглядят официальные расчеты Госкомстата относительно продолжительности жизни мужчин. Согласно официальным данным, половина юношей, которым сегодня исполнилось 16 лет, не доживет до 60. Под угрозой и здоровье населения страны. Ослаблена иммунная защита, растет число инфекционных заболеваний, рождается все больше неполноценных детей. Последствия этих изменений, даже если принять срочно самые серьезные меры, могут ощущаться на протяжении двух ближайших поколений российских граждан.

В целом сложившееся положение оказывает определенное морально-психологическое воздействие не только на занятых на производстве, но и на широкие круги населения, особенно в случае крупных аварий с человеческими жертвами. Все это усиливает социальную, а в ряде случаев

и политическую напряженность во многих регионах России, что также не способствует повышению безопасности общества, его устойчивому развитию. Вот почему *следует считать проблему обеспечения природной и техногенной безопасности социально-политической проблемой*, требующей своего положительного разрешения.

Увеличение числа и масштабов последствий техногенных аварий и катастроф обусловлено не только ростом сложности производства с применением новых технологий, требующих высоких концентраций энергии, опасных для жизни человека веществ и оказывающих заметное воздействие на компоненты окружающей среды, но и крупными структурными изменениями в экономике страны, приведшими к сбою в сфере финансирования, высоким и прогрессирующим уровням износа и старения основных фондов (например, в ряде производств химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности износ составил 80—100 %), падением технологической и производственной дисциплины и снижением квалификации персонала, переносов сроков ремонта и замены оборудования, упрощением регламентного обслуживания.

В последние годы некоторые страны (США, Нидерланды, Швеция) проводят специальные исследования по оценке риска и безопасности производств в крупных промышленных регионах, другие страны предполагают сделать это в ближайшем будущем. Широкомасштабная оценка безопасности предприятий промышленности в этих странах проводится не для того, чтобы подменить существующий подход к обеспечению безопасности, а для того, чтобы дополнить его, установить с его помощью более обоснованные критерии. На примере стран Западной Европы видно, что после начала действия механизма реализации мер снижения риска и обеспечения промышленной безопасности, количество аварий значительно сократилось (рис. п7).

Обеспечение безопасности населения и окружающей природной среды представляет собой весьма сложную техническую задачу, решение которой невозможно без совершенствования и углубления инженерной подготовки в области исследования надежности, прогнозирования и обеспечения безопасности технических систем. В ряде промышленно развитых стран изучение безопасности технических систем как отдельной независимой деятельности было введено в практику в шестидесятых годах (для примера можно привести деятельность США начиная с 50-х годов по созданию системы безопасности авиационно-космической техники). Центр внимания переместился от анализа поведения отдельных элементов различного типа (электрических, механических, гидравлических) на причины и последствия, вызываемые отказом этих элементов в соответствующей системе. «Дерево отказов», «Дерево последствий», «Метод последовательной экспертизы», «Экспертные оценки» и другие методы выявления отказов были взяты на вооружение специалистами, работающими в химической и других опасных отраслях промышленности, как раз из сферы военных и аэрокосмиче-

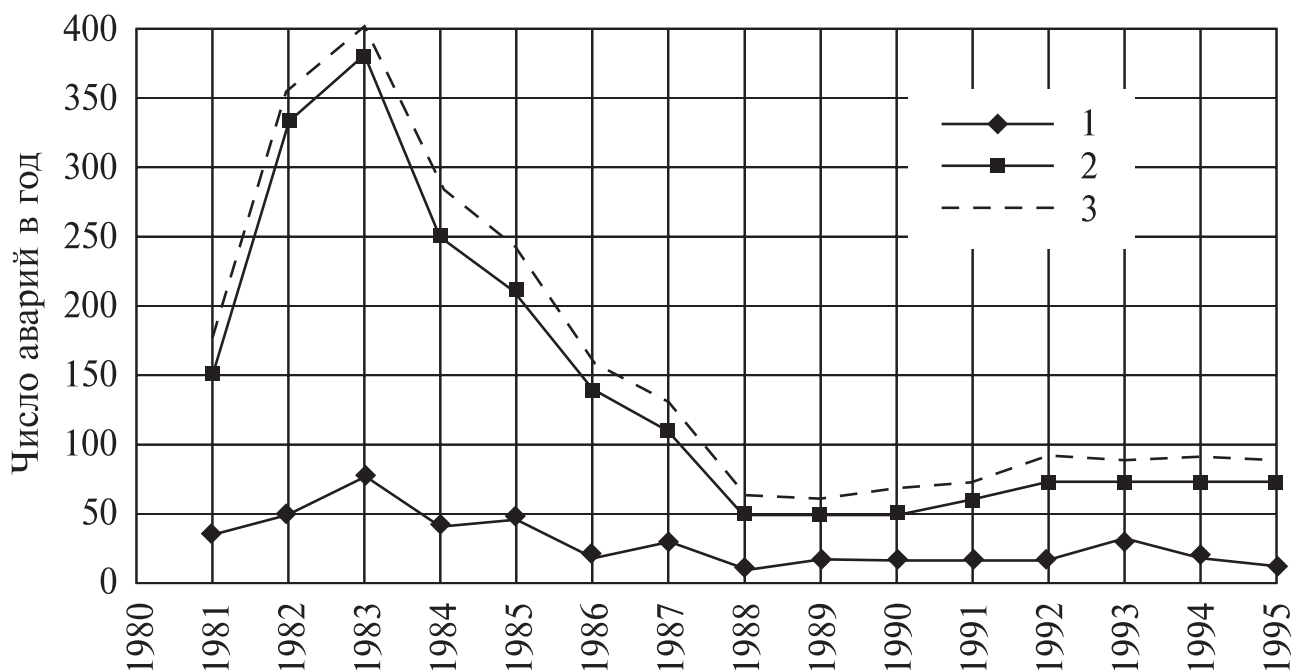


Рис. п7. Снижение числа аварий в высокорисковых отраслях Западной Европы:

1 — крупные аварии с материальным ущербом не менее 1 млн. дол.;
2 — аварии с остановкой производства; 3 — все аварии

ских исследований. Именно в этих странах 60-е годы были отмечены началом широкой публикации научных работ, относящихся к описываемой области исследований. В нашей стране такие работы (это касается открытой печати, доступной широкому кругу научно-технических работников) имели единичные издания. Это следовало из концепции «абсолютной безопасности» отечественных технологий и оборудования. Названная концепция до недавнего времени была фундаментом, на котором строились нормативы безопасности. Сказалась специфика политического, экономического и социального развития бывшего СССР, которая обусловила отставание по крайней мере на 20 лет [32, 35], в исследованиях в области промышленной безопасности, безопасности жизнедеятельности, экологии. Такое отношение к проблемам безопасности сдерживало формирование у специалистов представлений о принципах и методах обеспечения промышленной и экологической безопасности, что продуцировало отставание во всех сферах технической и образовательной деятельности: проектирования, изготовления, эксплуатации, надзора за безопасностью, подготовки специалистов, действий в чрезвычайных ситуациях и сказалось на росте количества и масштабов экстремальных ситуаций и аварий на промышленных предприятиях, транспортных системах и пр. Требование «абсолютной безопасности», т. е. «нулевого риска», в конечном счете, привело к дорогостоящим и даже к трагическим последствиям для населения и экономики страны. Специалисты, эксплуатирующие технические системы и обслуживающие опасные технологии в химической промышленности, системы энергетики

и трубопроводный транспорт, оказались неподготовленными в методическом плане к поиску и анализу критических отказов, приводящих к авариям. Уровень знаний в вопросах безопасности жизнедеятельности в технической сфере отстал от уровня сложности и темпов развития техники, технологий, технических систем.

Не следует строить иллюзий о безопасности предприятия даже в том случае, если на нем не происходит чрезвычайных ситуаций с разрушениями и гибелью персонала, к примеру, отказ системы очистки отходящего газа из-за ненадежности техники будет нести огромную опасность для людей и окружающей среды.

В настоящее время в России осуществляется переход от регистрации свершившегося факта к осознанию необходимости использования инженерных методов предварительного анализа и исследования технических систем и объектов повышенного риска с целью предупреждения аварий. Ясно, что в изменившихся условиях подход к решению проблем безопасности производств, экологических проблем, основанный на концепции «реагировать и выправлять», вынужден уступить место новому, где главенствует принцип «предвидеть и предупреждать». Встала задача прогнозирования техногенной деятельности — чтобы предотвратить тот ее предельный негативный масштаб, превышение которого оборачивается трагедией, катастрофами, экономическим и экологическим ущербом. Уместно здесь отметить, что, по подсчетам специалистов, сегодня на территории России размещены свыше 4,5 тыс. потенциально опасных объектов, в т. ч. до 800 — радиационно и примерно 1500 химически и биологически опасных сооружений и производств, которые относятся к объектам повышенного риска.

Вот почему методы исследования возможных отказов должны стать хорошим подспорьем для специалистов по инженерной защите окружающей среды или по безопасности жизнедеятельности, а поиск возможных отказов и анализ последствий должен стать распространенной, обычной процедурой при оценке сложных, дорогостоящих и высокорисковых предприятий, технологий и установок.

В настоящем учебном пособии систематизированы эти методы, а их научное изложение было адаптировано к учебному процессу по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск» для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Безопасность жизнедеятельности».

Академик Валерий Алексеевич Легасов еще в 70-е годы одним из первых в стране высказал мысль о том, что система знаний о закономерностях и состоянии защищенности людей и окружающей среды от техногенных опасностей должна стать самостоятельной научной дисциплиной.

В России в настоящее время интенсивно ведутся работы в сфере обеспечения безопасности эксплуатации технических систем, разрабатываются методики, направленные на определение надежности технических систем, оценку риска, совершенствуется законодательная и нормативная база. При подготовке данного учебного пособия были использованы основополагаю-

шие и современные работы из рассматриваемой области; список этих работ позволит расширить представления и знания по затронутой проблеме.

Учебное пособие написано в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования подготовки инженеров по специальностям «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», «Безопасность технологических процессов и производств», «Пожарная безопасность» и «Защита в чрезвычайных ситуациях». Оно может быть полезным инженерно-техническим работникам, занимающимся проблемами безопасности технических систем и экологической безопасности.

Учебное пособие, безусловно, не свободно от недостатков. Авторы будут благодарны всем, кто сочтет необходимым прислать свои отзывы, критические замечания или предложения к сотрудничеству в этом направлении.

Г Л А В А 1

Природа и характеристика опасностей в техносфере

1.1. Техносфера. Техника. Техническая система. Технология

Техносфера — часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (механизмы, здания, сооружения, горные выработки, дороги и т.д.) с помощью прямого или косвенного воздействия технических средств в целях наилучшего соответствия социально-экономическим потребностям человека. Таким образом, в преобразовании участвуют техника, технические системы и используемая технология.

Техника (от греч. *techne* — искусство, мастерство, умение) — совокупность средств человеческой деятельности, созданных для осуществления процессов производства и обслуживания непроектируемых потребностей общества. В технике материализованы знания и производственный опыт, накопленные человечеством в процессе развития производства. Техника облегчает трудовые усилия человека и увеличивает их эффективность, позволяет преобразовывать природу в соответствии с потребностями общества. По мере развития производства техника последовательно заменяет человека в выполнении технологических функций, связанных с физическим и умственным трудом. Средствами техники пользуются для воздействия на предметы труда при создании материальных и культурных благ, для получения, передачи и превращения энергии, исследования законов развития природы и общества, передвижения и связи, сбора, хранения, переработки и передачи информации, управления обществом, обслуживания быта, ведения войны и обеспечения обороны.

По функциональному назначению различают технику производственную, военную, бытовую, медицинскую, для научных исследований, образования, культуры и др.

Основную часть технических средств составляет производственная техника, к которой относятся машины и механизмы, инструменты, аппаратура управления машинами и технологическими процессами, а также производственные здания и сооружения, коммуникации и т. д.

Технику обычно классифицируют по отраслевой структуре производства (например, промышленности, транспорта) или применительно к отдельным структурным подразделениям производства. Например, техника авиационная, мелиоративная, энергетическая, химическая, горная и т. п.

Техника все в большей мере становится материализацией научных знаний. Развитие техники выражается в создании новых и усовершенствовании существующих типов машин, оборудования, повышения технического уровня производств, процессов, их комплексной механизации и автоматизации, в создании новых материалов, топлива и преобразователей энергии и т. п.

Исторически техника прошла путь развития от примитивных машин, выполняющих одну операцию, до сложнейших автоматических машин современного производства, объединенных в единое целое — систему, имеющую соответствующую структуру и направленную на достижение определенных целей.

Под **технической системой** (объектом) понимается упорядоченная совокупность отдельных элементов, связанных между собой функционально и взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение некоторых заданных функций (достижение цели) при различных состояниях работоспособности.

Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности: сооружения, установки, технические изделия, устройства, машины, аппараты, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали.

Упорядоченность означает, что относительно окружающей среды система выступает и соответственно воспринимается как нечто функционально единое.

Признаком системы является структурированность, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели (рис. 1.1).

Обязательным компонентом любой системы являются составляющие элементы (подсистемы), само понятие элемента условно и относительно, так как любой элемент, в свою очередь, всегда можно рассматривать как совокупность других элементов.

Поскольку все подсистемы и элементы, из которых состоит система, определенным образом размещены и взаимосвязаны, образуя данную систему, можно говорить о структуре системы. Структура системы — это то, что остается неизменным в системе при изменении ее состояния, реализации различных форм поведения, совершении системой операций и т. п.

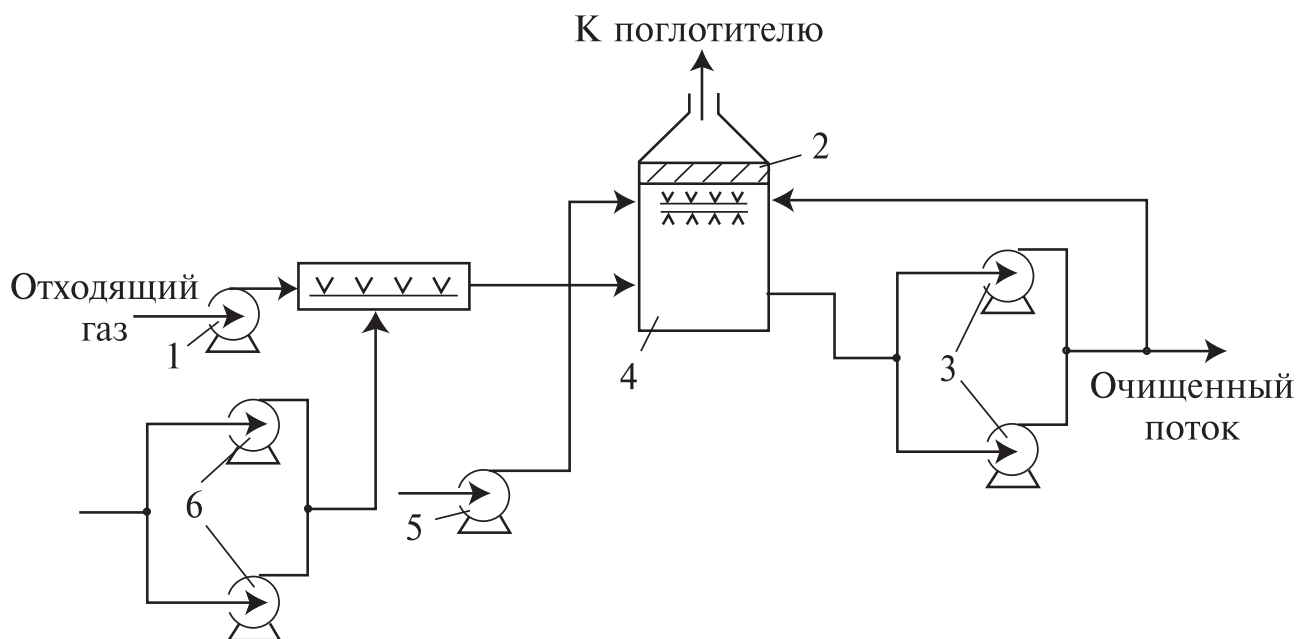


Рис. 1.1. Система охлаждения и очистки отработавшего газа:

1 — нагнетательный вентилятор; 2 — сетчатая прокладка; 3 — два циркуляционных насоса предварительной очистки газа; 4 — предварительный газоочиститель; 5 — водяной насос; 6 — два охлаждающих насоса

Любая система имеет, как правило, иерархическую структуру, т. е. может быть представлена в виде совокупности подсистем разного уровня, расположенных в порядке постепенности. При анализе тех или иных конкретных систем достаточным оказывается выделение некоторого определенного числа ступеней иерархии.

Системы функционируют в пространстве и времени. Процесс функционирования систем представляет собой изменение состояния системы, переход ее из одного состояния в другое. В соответствии с этим системы подразделяются на статические и динамические.

Статическая система — это система с одним возможным состоянием. Динамическая система — система с множеством состояний, в которой с течением времени происходит переход из одного состояния в другое.

С позиций безопасности задачи исследования технических систем заключаются в том, чтобы увидеть, каким образом элементы системы функционируют в системе во взаимодействии с другими ее частями и по каким причинам может произойти отказ, грозящий негативными последствиями для окружающей среды.

1.2. Определение опасности

Опасность — центральное понятие как сферы безопасности жизнедеятельности в техносфере, так и промышленной безопасности. Под опасностью понимаются явления, процессы, объекты, способные в определенных условиях наносить вред здоровью человека, ущерб окружающей природной сре-

де и социально-экономической инфраструктуре, т. е. вызывать нежелательные последствия непосредственно или косвенно. Другими словами, ***опасность — следствие действия некоторых негативных (вредных и опасных) факторов на определенный объект (предмет) воздействия. При несоответствии характеристик воздействующих факторов характеристикам объекта (предмета) воздействия и появляется феномен опасности*** (например, ударная волна, аномальная температура, недостаток кислорода в воздухе, токсичные примеси в воздухе и т. п.).

Опасность — свойство, внутренне присущее сложной технической системе. Она может реализоваться в виде прямого или косвенного ущерба для объекта (предмета) воздействия постепенно или внезапно и резко — в результате отказа системы. Скрытая (потенциальная) опасность для человека реализуется в форме травм, которые происходят при несчастных случаях, авариях, пожарах и пр., для технических систем — в форме разрушений, потери управляемости и т. д., для экологических систем — в виде загрязнений, утрате видового разнообразия и др.

Определяющие признаки — возможность непосредственного отрицательного воздействия на объект (предмет) воздействия; возможность нарушения нормального состояния элементов производственного процесса, в результате которого могут возникнуть аварии, взрывы, пожары, травмы. Наличие хотя бы одного из указанных признаков является достаточным для отнесения факторов к разделу опасных или вредных.

Количество признаков, характеризующих опасность, может быть увеличено или уменьшено в зависимости от целей анализа.

1.3. Аксиомы о потенциальной опасности технических систем

Анализ реальных аварийных ситуаций, событий и факторов и человеческая практика уже сегодня позволяют сформулировать ряд аксиом об опасности технических систем:

Аксиома 1. *Любая техническая система потенциально опасна.* Потенциальность опасности заключается в скрытом, неявном характере и проявляется при определенных условиях. Ни один вид технической системы при ее функционировании не обеспечивает абсолютной безопасности.

Аксиома 2. *Техногенные опасности существуют, если повседневные потоки вещества, энергии и информации в техносфере превышают пороговые значения.* Пороговые, или предельно допустимые, значения опасностей устанавливаются из условия сохранения функциональной и структурной целостности человека и природной среды. Соблюдение предельно допустимых значений потоков создает безопасные условия жизнедеятельности человека в жизненном пространстве и исключает негативное влияние техносферы на природную среду.

Аксиома 3. *Источниками техногенных опасностей являются элементы техносферы.* Опасности возникают при наличии дефектов и иных неисправностей в технических системах, при неправильном использовании технических систем. Технические неисправности и нарушения режимов использования технических систем приводят, как правило, к возникновению травмоопасных ситуаций, а выделение отходов (выбросы в атмосферу, стоки в гидросферу, поступление твердых веществ на земную поверхность, энергетические излучения и поля) сопровождается формированием вредных воздействий на человека, природную среду и элементы техносферы.

Аксиома 4. *Техногенные опасности действуют в пространстве и во времени.* Травмоопасные воздействия действуют, как правило, кратковременно и спонтанно в ограниченном пространстве. Они возникают при авариях и катастрофах, при взрывах и внезапных разрушениях зданий и сооружений. Зоны влияния таких негативных воздействий, как правило, ограничены, хотя возможно распространение их влияния и на значительные территории, например, при аварии на ЧАЭС.

Для вредных воздействий характерно длительное или периодическое негативное влияние на человека, природную среду и элементы техносферы. Пространственные зоны вредных воздействий изменяются в широких пределах от рабочих и бытовых зон до размеров всего земного пространства. К последним относятся воздействия выбросов парниковых и озоноразрушающих газов, поступление радиоактивных веществ в атмосферу и т. п.

Аксиома 5. *Техногенные опасности оказывают негативное воздействие на человека, природную среду и элементы техносферы одновременно.* Человек и окружающая его техносфера, находясь в непрерывном материальном, энергетическом и информационном обмене, образуют постоянно действующую пространственную систему «человек — техносфера». Одновременно существует и система «техносфера — природная среда». Техногенные опасности не действуют избирательно, они негативно воздействуют на все составляющие вышеупомянутых систем одновременно, если последние оказываются в зоне влияния опасностей.

Аксиома 6. *Техногенные опасности ухудшают здоровье людей, приводят к травмам, материальным потерям и к деградации природной среды.*

1.4. Таксономия опасностей

Таксономия — слово греческого происхождения (taxis — расположение по порядку + nomos — закон) — определяется в Словаре иностранных слов как «теория классификации и систематизации сложноорганизованных областей деятельности, имеющих обычно иерархическое строение». Таким образом, таксономия в науке — классификация и систематизация сложных явлений, понятий, объектов. Поскольку опасность является понятием сложным, иерархическим, имеющим много признаков, таксономирование

их выполняет важную роль в организации научного зрения в области безопасности деятельности и позволяет познать природу опасностей, дает новые подходы к задачам их описания, введения количественных характеристик и управления ими. Представляется возможным привести примеры имеющихся таксономий опасностей:

- по природе происхождения: природные, техногенные, антропогенные, экологические, смешанные опасности;
- производственные опасности: физические, химические, биологические, психофизиологические, организационные;
- по времени проявления отрицательных последствий: импульсивные (в виде кратковременного воздействия, например удар) и кумулятивные (накопление в живом организме и суммирование действия некоторых веществ и ядов);
- по месту локализации в окружающей среде: связанные с атмосферой, гидросферой, литосферой;
- по сфере деятельности человека: бытовые, производственные, спортивные, военные, дорожно-транспортные и т. д.;
- по приносимому ущербу: социальный, технический, экономический, экологический и т. д.;
- по характеру воздействия на человека: активные (оказывают непосредственное воздействие на человека путем заключенных в них энергетических ресурсов); пассивно-активные (активизирующиеся за счет энергии, носителем которой является сам человек; неровности поверхности, уклоны, подъемы, незначительное трение между соприкасающимися поверхностями и др.); пассивные — проявляются опосредованно (к этой группе относятся свойства, связанные с коррозией материалов, накипью, недостаточной прочностью конструкций, повышенными нагрузками на оборудование и т. п. Проявляются в виде разрушений, взрывов и т. п.);
- добровольные и принудительные опасности: воздействию опасностей можно подвергаться как добровольно, например, занимаясь горнолыжным спортом, альпинизмом или работая на промышленном предприятии, так и принудительно, находясь вблизи места событий в момент реализации опасностей. Такой подход позволяет выделять опасности производственные и непроизводственные (риск для населения);
- по структуре (строению): простые (электрический ток, повышенная температура) и производные опасности — порожденные взаимодействием простых (пожар, взрыв и т. п.);
- по сосредоточению: сконцентрированные (например, место захоронения токсичных отходов) и рассеянные (например, загрязнение почвы осажденными из атмосферы выбросами тепловых электростанций).

Список можно продолжить. Таксономия проводится в зависимости от того, какую цель поставил исследователь, например: оценить эффекты изменения состояния окружающей среды на организм человека.

Значительная часть перечисленных выше опасностей не всегда приводит к возникновению происшествий, но усложняет выполнение работ при регламентированной технологии. Таксономия позволяет выделить основные опасности.

1.4.1. Примеры таксономий

Здесь не приводится таксономия производственных опасностей. Классификация вредных и опасных производственных факторов подробно рассматривается в курсе БЖД. Приведенные примеры характерны для опасностей, возникающих при отказе технических систем.

Классификация по эффектам изменения окружающих условий. Любое заметное отклонение от привычных, определившихся в ходе длительной биологической эволюции условий существования человека, приводит к травмам или заболеваниям. Наиболее существенные параметры среды обитания человека, имеющие значение для его нормальной и безопасной жизнедеятельности, таковы:

- а) температура;
- б) давление окружающего атмосферного воздуха;
- в) внешнее давление, оказываемое на отдельные участки тела;
- г) концентрация кислорода;
- д) концентрация токсичных или коррозионно-активных веществ;
- е) концентрация болезнетворных микроорганизмов;
- ж) плотность потока электромагнитного излучения;
- з) уровень ионизирующих излучений;
- и) разность электрического потенциала;
- к) звуковые нагрузки.

Воздействия, связанные с повышением или понижением температуры человеческого тела (как изнутри, так и снаружи), могут приводить к травмам или смерти. К таким воздействиям относятся: тепловое излучение, конвекция и прямая теплопередача с кожного покрова или к нему, вдыхание чересчур холодного или горячего воздуха, употребление внутрь слишком холодных или теплых жидкостей или твердых веществ.

Внезапные изменения окружающего воздуха, обусловленные действием воздушных ударных волн, могут приводить к травмам или смерти.

Механические травмы возникают из-за приложения чрезмерного давления к отдельным участкам человеческого тела. Механические травмы — это рваные и резаные раны, ушибы, переломы, разможнение, отрывы частей тела, травмы, затрагивающие жизненно важные органы — мозг, сердце, легкие и др.

Снижение концентрации кислорода в воздухе приводит к травмам и смерти. Перерыв в дыхании происходит, если человек тонет или погребен под твердыми материалами. С другой стороны, и избыток кислорода опасен. При повышенной концентрации кислорода резко возрастает пожарная опасность.

Хорошо известно, что присутствие определенных веществ в окружающей среде приводит к заболеванию или смерти (например, избыточная концентрация оксида или диоксида углерода).

Также хорошо известно, что избыточная концентрация болезнетворных микроорганизмов вредна и приводит к инфекционным заболеваниям.

Для всех длин волн электромагнитного излучения существуют пределы интенсивности, за которыми их воздействие на организм человека становится опасным для здоровья.

Человеческий организм приспособился к существованию в условиях естественного радиоактивного фона, а вклад относительно небольшой техносферной составляющей (ядерной энергетики в нормальных условиях эксплуатации, медицинской диагностики, неразрушающих методов контроля в технике и т. д.) можно считать безвредным. Повышенный уровень дозовых нагрузок приводит к хроническим заболеваниям, значительные дозы вызывают лучевую болезнь и смерть.

Человеческий организм чувствителен к разности потенциалов порядка десятков вольт. Разность потенциалов в сотни вольт (безразлично — постоянного или переменного напряжения) вполне может привести к гибели.

Звуковые и вибрационные нагрузки могут привести к хроническим заболеваниям несмертельного характера.

Таксономия по времени реализации. В медицине издавна используются термины «острый» и «хронический» для описания характера заболевания: быстро развивающуюся и бурно протекающую болезнь называют «острой», медленно развивающаяся и долго текущая болезнь обозначается как «хроническая». В медицине никогда не придавалось точного значения понятиям «быстро» и «медленно». С медицинской точки зрения понятия «острый» или «хронический» никоим образом не связывалось с тяжестью заболевания, такое понимание этих терминов сохранено при рассмотрении опасностей. Легко видеть, что термины «острый» и «хронический» отвечают противоположным полюсам некоего диапазона значений; провести строгую разделительную черту между ними весьма непросто. Термин «острая» будет относиться к опасностям, для которых время проявления действия не превышает часа. Опасность будет называться «хронической», если ее реализация занимает более месяца. Опасности, срок реализации которых находится внутри обозначенного интервала, будут рассматриваться как нечто среднее между острыми и хроническими опасностями. Табл. 1.1 иллюстрирует использование такой классификации. Под временем действия опасности понимается период, в течение которого зарождаются, развиваются и действуют поражающие факторы.

Таксономия опасностей по числу пораженных. Идея этой классификации — качественная характеристика индивидуальных и групповых опасностей. Значимые качественные различия между этими классами опасностей (несмотря на существование количественной близости между ними) отражены в табл. 1.2. Эти различия могут быть положены в основу регулирования и выявления основных опасностей — в отличие от прочих.

Таблица 1.1

Временной масштаб опасных событий

Время действия опасности	Последствия опасного события
0,01 с	Смерть от взрыва взрывчатого вещества
2—3 мин.	Смерть от электрического тока
5—7 мин.	Удушье, утопление
10—60 мин.	Отравление хлором
Сутки	Поражение, обусловленное действием диоксина
Месяцы или годы	Отравление свинцом или другими тяжелыми металлами
Годы	Развитие злокачественных новообразований, пневмокониозов

Таблица 1.2

Характеристики индивидуальных и групповых опасностей

Индивидуальные опасности	Групповые опасности
Изменения окружающей среды незначительны	Крупные экологические последствия
Предотвращение требует тактических мер	Предотвращение требует стратегических мер
Жертвы часто были причиной несчастного случая	Жертвы, как правило, не были причиной аварии
Эргономические аспекты существенны	Эргономика не столь существенна
Предотвращение возможно за счет управления индивидуумом	Необходимо контролирование производства для предотвращения аварии
Ущерб незначительный	Ущерб крупный
Большей частью игнорируется общественностью и средствами массовой информации	Преувеличиваются как населением, так и средствами массовой информации
Могут быть вызваны единственной ошибкой	Обусловлены, как правило, сочетанием нескольких обстоятельств
Присущи трудоемким отраслям промышленности	Присущи капиталоемким (энергонасыщенным) отраслям промышленности
Доля несчастных случаев в общем числе аварий: 1/100—1/1000	Доля несчастных случаев в общем числе аварий: 1/1—1/10

Таксономия по виду энергетического носителя:

а) механические — характеризуются кинетической и потенциальной энергией и механическим влиянием на объекты воздействия, к ним относятся: кинетическая энергия движущихся и вращающихся элементов, потенциальная энергия тел (в том числе людей, находящихся на высоте), шумы (ультразвук, инфразвук), вибрация, ускорения, гравитационная тяжесть, статическая нагрузка, дым, туман, ударная волна и др.;

б) термические — характеризуются тепловой энергией и аномальной температурой, к ним относятся: температура нагретых или охлажденных поверхностей, открытого огня, пожара, химических реакций и др. источников; сюда относятся и параметры микроклимата, нарушающие терморегуляцию организма;

в) электрические — электрический ток, статическое электричество, ионизирующие излучения, электрическое поле, аномальная ионизация воздуха;

г) электромагнитные — освещенность, ультрафиолетовая и инфракрасная радиация, электромагнитные излучения, магнитное поле;

д) химические — едкие, ядовитые, огне- и взрывоопасные вещества, а также нарушение естественного газового состава воздуха, наличие вредных примесей в воздухе.

Таксономия факторов, обуславливающих возможные отказы технических систем. Любая система эксплуатируется в определенных условиях окружающей среды; она испытывает воздействие факторов окружающей среды (климатических, динамических, биологических и др.), факторов нагрузки (режима работы и взаимодействие элементов), а также искусственных факторов (преднамеренное воздействие извне).

Эти факторы могут привести к изменению параметров и состояния работоспособности отдельных элементов, узлов и системы в целом. Представляется целесообразным привести таксономию таких факторов [75].

1. Перегрузка в результате недооценки действующей нагрузки:

- снег и непродуманная его расчистка, наледи;
- производственная пыль;
- несоответствие фактических масс конструкций запроектированным;
- ветер;
- крановая нагрузка;
- динамические воздействия нагрузки;
- температурные воздействия.

2. Потеря устойчивости (общая и местная):

- ошибки в расчетах, чертежах, нарушение правил производства работ;
- слабая экспериментальная отработка проектных решений;
- большая гибкость элементов, эксцентриситет при приложении нагрузки;
- податливость монтажных стыков, несвоевременная или неправильная анкеровка опор;

- температурные деформации при неправильном закреплении связей;
 - недостаточная толщина листовых конструкций;
 - искажение геометрических формы конструкций (особенно тонкостенных);
 - неудачное крепление вант, оттяжек;
 - наличие вмятин и местных искривлений.
3. Неудачные проектные решения и отступления от проекта:
- неудачный выбор расчетной схемы (несоответствие действительной работе конструкции);
 - низкая точность расчета;
 - недоработка узлов сопряжений;
 - занижение расчетной нагрузки по сравнению с реальной;
 - недооценка жесткости узлов;
 - недостаточная жесткость, прочность, устойчивость;
 - замена одного материала другим;
 - низкая квалификация исполнителей;
 - отсутствие авторского и технического надзора;
 - наличие концентраторов напряжений.
4. Некачественное изготовление и монтаж конструкций:
- применение некачественных материалов;
 - низкое качество изготовления конструкций;
 - неправильный выбор способа и порядка монтажа;
 - несвоевременная постановка связей жесткости;
 - некачественная сварка;
 - нарушение технологии сварки в зимнее время;
 - ввод в действие сооружений с существенными недостатками.
5. Нарушение правил эксплуатации конструкций и сооружений:
- отсутствие защиты конструкций, работающих в агрессивных средах (резкие температурные колебания и изменения влажности);
 - взрывы, пожары, затопления;
 - вибрации, удары, истирание;
 - отсутствие надлежащего инструментального контроля;
 - перегрузка производственной пылью;
 - увеличение нагрузки без усиления конструкций и регулирования напряжений в них.
6. Усталость, вибрация, коррозия и старение материала:
- усталостные разрушения;
 - разрушения от старения;
 - вибродинамическое действие кранов, подвижного состава;
 - загрязнение окружающей среды;
 - наличие поверхностных дефектов в конструкциях;
 - резкие колебания температуры;
 - осадки.

7. Дефектность оснований, на которые установлены конструкции:

- неравномерная осадка сооружений, колонн;
- дефекты кирпичной кладки;
- наличие перекошенных закладных частей;
- потеря устойчивости основания;
- неравномерное промораживание грунта;
- оттаивание грунта в зоне многолетнемерзлого грунта;
- пучение грунта;
- замачивание лессовидных грунтов;
- блуждающие токи в грунте;
- агрессивные грунтовые воды;
- засоленные грунты;
- дефекты инженерно-геологических изысканий.

8. Непредвиденные (непрогнозируемые) причины:

- аварии от провалов, оползней, осыпей, обрушений вышележащих конструкций;
- сейсмические воздействия и извержения вулканов;
- грозовые разряды, град, падение метеоритов;
- аварии от биологических вредителей;
- ураганы, наводнения, цунами, ледоходы, сели;
- ландшафтные пожары;
- подмыв фундаментов, переувлажнение оснований.

Основные выводы. Опасности — многоаспектное явление, и трудно, а подчас и невозможно рассматривать одни составные части опасности в отрыве от других. Необходимо иметь представление о том, каких последствий следует ожидать, насколько велика угроза для окружающей природной среды и для общества. Рис. 1.2, построенный В. Маршаллом [38], представляет взаимосвязь между временным масштабом опасностей техносферы и числом несчастных случаев. Его можно рассматривать как наглядную иллюстрацию различий между групповыми и одиночными несчастными случаями, групповыми профессиональными заболеваниями. Видно, например, повышение значения медицинского вмешательства с увеличением временного масштаба. Рисунок одновременно указывает на связь опасностей и риска. Опасность одиночных несчастных случаев низка (поскольку пострадавший всегда один), однако риск велик. Для групповых несчастных случаев имеет место противоположная закономерность. Аналогично одиночные заболевания (когда заболевает лишь малая доля пострадавших) присущи малым опасностям с высоким риском, тогда как для групповых заболеваний (вспышек) опасность велика, а риск мал (из-за длительности между периодами заражения ввиду редкости событий).

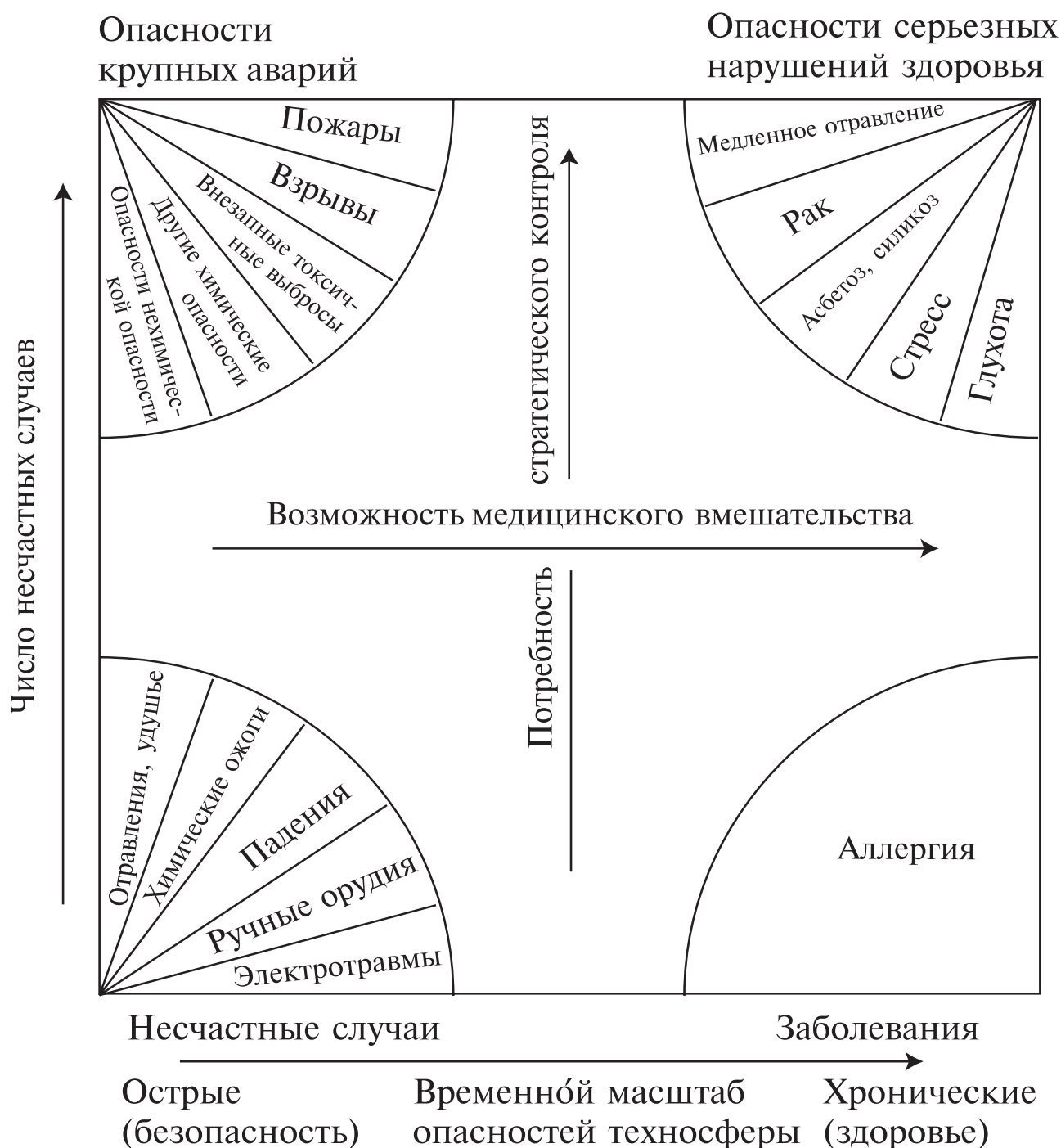


Рис. 1.2. Взаимосвязь таксономий

1.5. Алгоритм развития опасности и ее реализации

Собственно процесс развития опасности можно описать следующей логической последовательностью: *нарушение технологического процесса, допустимых пределов эксплуатации, условий содержания и т. п.* → *накопление, образование поражающих факторов, приводящих к аварии технические системы* → *разрушение конструкции* → *выброс, образование поражающих факторов* → *воздействие (взаимодействие) поражающих факторов с объектом воздействия (с окружающей природной средой, человеком, объектами техносферы и пр.)* → *реакция на поражающее воздействие.*

В зависимости от особенностей технической системы отдельные элементы приведенной цепи могут отсутствовать. Каждому такому событию можно приписать частный показатель в виде вероятности события: *вероятность отказа технической системы* → *вероятность аварийного исхода* → *вероятность образования поражающих факторов* → *вероятность поражения объектов воздействия* → *вероятность вторичных поражающих факторов* → *вероятность воздействия* → *вероятность поражения*. Из приведенной логической последовательности следует, что наличие потенциальной опасности в системе не всегда сопровождается ее негативным воздействием на объект. Любое исключение в цепи ведет к нереализации опасности.

Для реализации опасности необходимо выполнение минимум трех условий: опасность реально действует (присутствует); объект находится в зоне действия опасности; объект не имеет достаточных средств защиты.

1.6. Источники опасности

Источниками опасности (материальными носителями) являются: человек; объекты, формирующие трудовой процесс и входящие в него: предметы труда, средства труда (машины, станки, инструменты, сооружения, здания, земля, дороги, энергия и т. п.); продукты труда; технология, операции, действия; природно-климатическая среда (грозы, наводнения, солнечная активность и т. п.); флора, фауна. При анализе обстановки среды деятельности человека вырисовываются как внешние, так и внутренние источники опасности.

Внешние источники — два рода явлений: состояние среды деятельности (технические системы) и ошибочные, непредвиденные действия персонала, приводящие к авариям и создающие для окружающей среды и людей рискованные ситуации. При этом разные факторы среды обитания воздействуют неодинаково: если техника и технологии могут представлять непосредственную опасность, то социально-психологическая среда, за исключением случаев прямого вредительства, влияют на человека через его психологическое состояние, через дезорганизацию его деятельности.

Внутренние источники опасности обусловлены виктимностью — личными особенностями работающего, которые связаны с его социальными и психологическими свойствами и представляют субъективный аспект опасности (этот аспект более подробно рассматривается психологией безопасности деятельности).

1.7. Энергоэнтропийная концепция опасностей

Эксплуатация технических систем потенциально опасна, так как связана с различными процессами, а последние — с использованием (выработкой, транспортировкой, хранением и преобразованием) химической, электрической и других видов энергии, накопленной в оборудовании и материалах, непосредственно в человеке и окружающей среде. **Опасность проявляется в результате неконтролируемого выхода энергии.** В определенных условиях неконтролируемый выход энергии сопровождается происшествиями. Таблица 1.3 иллюстрирует настоящую концепцию.

Таблица 1.3

Оценка числа смертельных случаев, вызванных различными источниками энергии в расчете на один гигаватт

Вид топлива или энергии	Конечная форма энергии*	Число жертв на ГВт		
		профессиональных	населения	всего
Метанол, биопродукты	м	110	0	110
Энергия ветра	э	20—30	2—40	22—70
Солнечная, фотоэлектрическая	э	16—21	1—40	17—61
Уголь	э	2—10	3—150	5—160
Солнечная, тепловая	э	7—10	1—40	8—50
Нефть	э	0,2—2	1,4—140	1,6—142
Солнечная (нагрев)	т	9—10	0,4	9—10
Гидроэлектростанция	э	2—4	1—2	3—6
Океан (тепловая)	э	2—3	0,1	2—3
Атомная	э	0,2—1,3	0,04—0,24	0,25—1,5
Природный газ	э	0,1—0,4	0	0,1—0,4

* Конечная форма энергии: э — электрическая; м — механическая; т — тепловая.

1.8. Номенклатура опасностей

Номенклатура (лат. nomenclatura) — перечень категорий, названий, терминов, употребляемых в отраслях науки и техники, систематизированных по определенному признаку. В настоящее время представляется возможным представить общую номенклатуру опасностей в алфавитном порядке. Алкоголь, аномальная температура воздуха, аномальная влажность воздуха, аномальная подвижность воздуха, аномальное барометрическое давление, ..., вакуум, взрыв, взрывчатые вещества, вибрация, ..., динамические перегрузки, ..., эмоциональная перегрузка, ядовитые вещества.

При выполнении конкретных исследований составляется номенклатура опасностей для отдельных объектов деятельности (местность, производства, рабочие места, технологические процессы и др.).

1.9. Квантификация опасностей

Квантификация (лат. *quatum* — сколько) — количественное выражение, измерение, вводимое для оценки сложных, качественно определяемых понятий.

Опасности характеризуются потенциалом, качеством, временем существования или воздействия на человека, вероятностью появления, размерами зоны действия.

Потенциал проявляется с количественной стороны, например, уровень шума, запыленность воздуха, напряжение электрического тока.

Качество отражает его специфические особенности, влияющие на организм человека, например, частотный состав шума, дисперсность пыли, род электрического тока.

Применяются численные, балльные и другие приемы квантификации.

Мерой опасности может выступать и число пострадавших. Известно, например, что каждый добытый 1 млн т угля в бывшем СССР стоил жизни одному шахтеру. В настоящее время в России этот уровень приблизился к двум.

Другой мерой опасности может быть и приносимый ее реализацией ущерб для окружающей среды, который только частично может быть измерен экономически (в основном через затраты на ликвидацию последствий).

Наиболее распространенной оценкой является риск — вероятность потерь при действиях, сопряженных с опасностями. Проблеме риска посвящена отдельная глава.

1.10. Идентификация опасностей

Опасности носят потенциальный, т. е. скрытый характер. Под идентификацией (лат. *indentifico*) понимается процесс обнаружения и установления количественных, временных, пространственных и иных характеристик, необходимых и достаточных для разработки профилактических и оперативных мероприятий, направленных на обеспечение нормального функционирования технических систем и качества жизни.

В процессе идентификации выявляются номенклатура опасностей, вероятность их проявления, пространственная локализация (координаты), возможный ущерб и другие параметры, необходимые для решения конкретной задачи.

Методы обнаружения опасностей делятся на:

- **инженерный**. Определяет опасности, которые имеют вероятностную природу происхождения.
- **экспертный**. Он направлен на поиск отказов и их причин. При этом создается специальная экспертная группа, в состав которой входят разные специалисты, дающие заключение.
- **социологический** метод. Применяется при определении опасностей путем исследования мнения населения (социальной группы). Формируется путем опросов.
- **регистрационный**. Заключается в использовании информации о подсчете конкретных событий, затрат каких-либо ресурсов, количестве жертв.
- **органолептический**. При органолептическом методе используют информацию, получаемую органами чувств человека (зрением, осязанием, обонянием, вкусом и др.). Примеры применения — внешний визуальный осмотр техники, изделия, определение на слух (по монотонности звука) четкости работы двигателя и пр.

В следующих главах будут рассмотрены подробно инженерные методы и метод экспертизы технических систем.

1.11. Причины и последствия

Условия, при которых реализуются потенциальные опасности, называются причинами. Они характеризуют совокупность обстоятельств, благодаря которым опасности проявляются и вызывают те или иные нежелательные события — последствия. Формы нежелательного последствия различны: травмы, материальный ущерб, урон окружающей среде и др. «**Опасность — причина — нежелательные последствия**» — это логический процесс развития, реализующий потенциальную опасность в реальное нежелательное последствие. Как правило, этот процесс является многопричинным.

1.12. Пороговый уровень опасности

Организмы и растения способны без вреда для себя переносить воздействие опасностей в определенных количествах, например, загрязняющих веществ, теплового излучения, вибрации. Их уровень, ниже которого болезненные реакции не наблюдаются, называют пороговым уровнем. При больших количествах проявляются отрицательные воздействия. Они зависят от величины опасной дозы (P), так и от длительности воздействия (экспозиции) опасности (t). При короткой экспозиции (малой длительности) переносимы более высокие уровни, т.е. пороговые значения для них могут быть выше и понижаться при более длительной экспозиции (рис. 1.3).

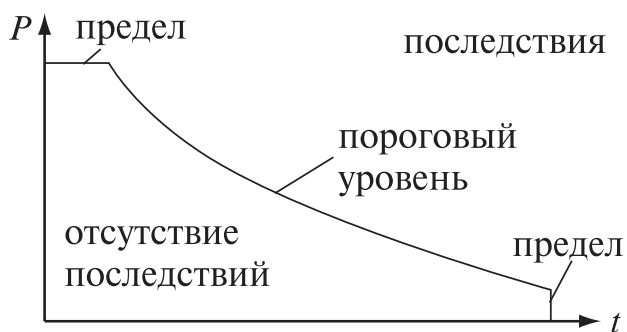


Рис. 1.3. Пороговый уровень воздействия опасностей

Для ряда опасностей, способных к биоаккумуляции, таких как, например, загрязнители элементов биосферы (тяжелые металлы, ДДТ), существуют определенные пределы, в рамках которых организм способен компенсировать их негативное воздействие. Именно такой подход заложен в ряд предельно допустимых значений — ПДУ (предельно допустимый уровень), ПДК (предельно допустимая концентрация) и др.

Установление значений предельных доз воздействия базируется на подпороговых концентрациях веществ (или иных величин воздействия), при которых не наблюдается сколько-нибудь заметного отклонения или изменения функционального состояния организма, определенного точными и чувствительными физиологическими, биохимическими и патогистологическими методами, принятыми в современных медико-биологических исследованиях. Исходя из этого, предметом регламентирования при оценке влияния опасных и вредных факторов на безопасность жизнедеятельности человека является степень влияния факторов среды на характер и уровень изменений функционального состояния, функциональных возможностей организма, его потенциальных резервов, адаптивных способностей и возможностей развития последних.

Для исключения необратимых биологических эффектов устанавливают нормируемые безопасные и предельно допустимые уровни или концентрации энергетического или биологического воздействия. При определении предельно допустимых значений приходится делать выбор между вероятностью нанести ущерб здоровью человека и экономической выгодой обеспечения более жестких нормативов.

Пороговый уровень воздействия опасности существует и для технических систем, строительных конструкций, горно-технических сооружений и т. д. Он характеризуется способностью элементов технических систем, строительных конструкций и т.д. сопротивляться до определенного предела и в течение определенного времени негативным (разрушающим) воздействиям или полезным (рабочим) нагрузкам, сохраняя при этом свои заданные функции. Этот уровень оценивается качественными и количественными характеристиками материала элементов или систем в целом, именуемыми показателями надежности.

1.13. Показатели безопасности технических систем

Определяют способность системы обуславливать при ее эксплуатации безопасность обслуживающего персонала и населения.

К показателям безопасности следует отнести вероятность безопасной работы человека в конкретных условиях в течение определенного времени, время срабатывания блокировочных и защитных устройств, электропрочность линий передач и т. д.

Хотя безопасность рассматривается как одно из свойств надежности, оно выходит за рамки надежности, поскольку неполнота безопасности может проявляться и в нормальных условиях работы объекта. Примером может служить работа теплоэлектроцентралей на органическом топливе (угле, сланце, мазуте) с нормальным режимом функционирования котлов, но с выбросами в атмосферу вредных продуктов сгорания в дозах, превышающих допустимые из-за несоответствия качества топлива режимам горения. Этот случай также можно рассматривать как отказ системы, при котором следует изменить режимы сжигания или режимы работы фильтров.

Показатели надежности. К показателям надежности относятся показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности (их изучает теория надежности).

Эргономические показатели. Определяют систему взаимодействия «человек-машина» и характеризуют комплекс гигиенических, антропометрических, физиологических и психологических свойств, которые проявляются в процессах взаимодействия системы «человек-машина» (изучаются инженерной психологией и эргономикой).

Гигиенические показатели используют при определении соответствия системы условиям жизнедеятельности и работоспособности человека при его взаимодействии с технической системой (показатели освещенности, температуры, влажности, магнитного и электрического полей, запыленности, излучения, токсичности, шума, вибрации, перегрузок и т. д.).

Физиологические и психофизиологические показатели используют при определении соответствия системы физиологическим свойствам человека и особенностям функционирования его органов чувств.

Такие показатели характеризуют соответствие системы возможностям человека воспринимать и перерабатывать информацию, соответствие системы закрепленным и вновь приобретенным навыкам человека.

Экологические показатели определяют уровень вредных воздействий на окружающую среду при эксплуатации, производстве, потреблении и транспортировании продукции.

К ним следует отнести: содержание вредных компонентов, выбрасываемых в окружающую среду; вероятность выбросов вредных компонентов (газов, жидкостей, различных излучений и т. д.).

Экономические показатели. Характеризуют объем затрат на обеспечение допустимого уровня безопасности.

Г Л А В А 2

Основные положения теории риска

2.1. Понятие риска

Специалисты различных отраслей промышленности в своих сообщениях и докладах постоянно оперируют не только определением «опасность», но и таким термином, как «риск».

В научной литературе встречается весьма различная трактовка термина «риск», и в него иногда вкладываются отличающиеся друг от друга содержания. Например, риск в терминологии страхования используется для обозначения предмета страхования (промышленного предприятия или фирмы), страхового случая (наводнения, пожара, взрыва и пр.), страховой суммы (опасности в денежном выражении) или же как собирательный термин для обозначения нежелательных или неопределенных событий. Экономисты и статисты, сталкивающиеся с этими вопросами, понимают риск как меру возможных последствий, которые проявятся в определенный момент в будущем. В психологическом словаре риск трактуется как действие, направленное на привлекательную цель, достижение которой сопряжено с элементами опасности, угрозой потери, неуспеха, либо как ситуативная характеристика деятельности, состоящая в неопределенности ее исхода и возможных неблагоприятных последствий в случае неуспеха, либо как мера неблагополучия при неуспехе в деятельности, определяемая сочетанием вероятности и величины неблагоприятных последствий в этом случае. Ряд трактовок раскрывает риск как вероятность возникновения несчастного случая, опасности, аварии или катастрофы при определенных условиях (состоянии) производства или окружающей человека среды. Приведенные определения подчеркивают как значение активной деятельности субъекта, так и объективные свойства окружающей среды.

Общим во всех приведенных представлениях является то, что риск включает неуверенность, произойдет ли нежелательное событие и возникнет ли неблагоприятное состояние. Заметим, что в соответствии с современными взглядами риск обычно интерпретируется как вероятностная мера возникновения техногенных или природных явлений, сопровождающихся

возникновением, формированием и действием опасностей и нанесенного при этом социального, экономического, экологического и других видов ущерба и вреда.

Под риском следует понимать ожидаемую частоту или вероятность возникновения опасностей определенного класса, или же размер возможного ущерба (потерь, вреда) от нежелательного события, или же некоторую комбинацию этих величин.

Применение понятия риск, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск, фактически, есть мера опасности. Часто используют понятие «степень риска» (Level of risk), по сути не отличающееся от понятия риск, но лишь подчеркивающее, что речь идет об измеряемой величине.

Все названные (или подобные) интерпретации термина «риск» используются в настоящее время при анализе опасностей и управлении безопасностью (риском) технологических процессов и производств в целом.

Точное понимание употребляемого термина станет ясным после дальнейшего ознакомления с содержанием настоящей главы.

Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций — результат определенной совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками.

Применительно к проблеме безопасности жизнедеятельности таким событием может быть ухудшение здоровья или смерть человека, авария или катастрофа технической системы или устройства, загрязнения или разрушение экологической системы, гибель группы людей или возрастание смертности населения, материальный ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличение затрат на безопасность.

Каждое нежелательное событие может возникнуть по отношению к определенной жертве — объекту риска. Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать *индивидуальный, технический, экологический, социальный и экономический* риски. Каждый вид его обуславливают характерные источники и факторы риска, классификация и характеристика которого приведены в табл. 2.1.

Индивидуальный риск обусловлен вероятностью реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций. Его можно определить по числу реализовавшихся факторов риска:

$$R_{И} = \frac{P(t)}{L(f)}, \quad (2.1.1)$$

где: $R_{И}$ — индивидуальный риск;

P — число пострадавших (погибших) в единицу времени t от определенного фактора риска f ;

L — число людей, подверженных соответствующему фактору риска f в единицу времени t .

Таблица 2.1

Классификация и характеристика видов риска

Вид риска	Объект риска	Источник риска	Нежелательное событие
Индивидуальный	Человек	Условия жизнедеятельности человека	Заболевание, травма, инвалидность, смерть
Технический	Технические системы и объекты	Техническое несовершенство, нарушение правил эксплуатации технических систем и объектов	Авария, взрыв, катастрофа, пожар, разрушение
Экологический	Экологические системы	Антропогенное вмешательство в природную среду, техногенные чрезвычайные ситуации	Антропогенные экологические катастрофы, стихийные бедствия
Социальный	Социальные группы	Чрезвычайная ситуация, снижение качества жизни	Групповые травмы, заболевания, гибель людей, рост смертности
Экономический	Материальные ресурсы	Повышенная опасность производства или природной среды	Увеличение затрат на безопасность, ущерб от недостаточной защищенности

Источники и факторы индивидуального риска приведены в табл. 2.2.

Индивидуальный риск может быть добровольным, если он обусловлен деятельностью человека на добровольной основе, и вынужденным, если человек подвергается риску в составе части общества (например, проживание в экологически неблагоприятных регионах, вблизи источников повышенной опасности).

Технический риск — комплексный показатель надежности элементов техносферы. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений:

$$R_T = \frac{\Delta T(t)}{T(f)}, \quad (2.1.2)$$

где: R_T — технический риск;

ΔT — число аварий в единицу времени t на идентичных технических системах и объектах;

T — число идентичных технических систем и объектов, подверженных общему фактору риска f .

Источники и факторы технического риска приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.2

Источники и факторы индивидуального риска

Источник индивидуального риска	Наиболее распространенный фактор риска смерти
Внутренняя среда организма человека	Наследственно-генетические, психосоматические заболевания, старение
Виктимность	Совокупность личностных качеств человека как жертвы потенциальных опасностей
Привычки	Курение, употребление алкоголя, наркотиков, иррациональное питание
Социальная экология	Некачественные воздух, вода, продукты питания; вирусные инфекции, бытовые травмы, пожары
Профессиональная деятельность	Опасные и вредные производственные факторы
Транспортные сообщения	Аварии и катастрофы транспортных средств, их столкновения с человеком
Непрофессиональная деятельность	Опасности, обусловленные любительским спортом, туризмом, другими увлечениями
Социальная среда	Вооруженный конфликт, преступление, суицид, убийство
Окружающая природная среда	Землетрясение, извержение вулкана, наводнение, оползни, ураган и другие стихийные бедствия

Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия. Нежелательные события экологического риска могут проявляться как непосредственно в зонах вмешательства, так и за их пределами:

$$R_O = \frac{\Delta O(t)}{O}, \quad (2.1.3)$$

где: R_O — экологический риск;

ΔO — число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий в единицу времени t ;

O — число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории.

Масштабы экологического риска R_O^m оцениваются процентным соотношением площади кризисных или катастрофических территорий ΔS к общей площади рассматриваемого биогеоценоза S :

Таблица 2.3

Источники и факторы технического риска

Источник технического риска	Наиболее распространенные факторы технического риска
Низкий уровень научно-исследовательских работ	Ошибочный выбор направлений развития техники и технологии по критериям безопасности
То же, опытно-конструкторских работ	Выбор потенциально опасных конструктивных схем и принципов действия технических систем. Ошибки в определении эксплуатационных нагрузок. Неправильный выбор конструкционных материалов. Недостаточный запас прочности. Отсутствие в проектах технических средств безопасности
Опытное производство новой техники	Некачественная доводка конструкций, технологии, документации по критериям безопасности
Серийный выпуск небезопасной техники	Отклонение от заданного химического состава конструкционных материалов. Недостаточная точность конструктивных размеров. Нарушение режимов термической и химико-термической обработки деталей. Нарушение регламентов сборки и монтажа конструкций и машин
Нарушение правил безопасной эксплуатации технических систем	Использование техники не по назначению. Нарушение паспортных (проектных) режимов эксплуатации. Несвоевременные профилактические осмотры и ремонты. Нарушение требований транспортирования и хранения
Ошибки персонала	Слабые навыки действия в сложной ситуации. Неумение оценивать информацию о состоянии процесса. Слабое знание сущности происходящего процесса. Отсутствие самообладания в условиях стресса. Недисциплинированность

$$R_O^m = \frac{\Delta S}{S}. \quad (2.1.4)$$

Дополнительным косвенным критерием экологического риска может служить интегральный показатель экологичности территории предприятия, соотносимой с динамикой плотности населения (численности работающих):

$$O_T = \pm \Delta L = \frac{\pm \Delta M(t)}{S}, \quad (2.1.5)$$

где: O_T — уровень экологичности территории;
 ΔL — динамика плотности населения (работающих);
 S — площадь исследуемой территории;
 ΔM — динамика прироста численности населения (работающих) в течение периода наблюдения t :

$$\Delta M = G + F - U - V, \quad (2.1.6)$$

где: G, F, U, V — соответственно численность родившихся за наблюдаемый период, прибывших в данную местность на постоянное местожительство, умерших и погибших, выехавших в другую местность на постоянное местожительство (уволившихся).

В этой формуле разность $G - U$ характеризует естественный, а $F - V$ — миграционный прирост населения на территории (текучесть кадров).

Положительные значения уровней экологичности позволяют разделять территории по степени экологического благополучия и, наоборот, отрицательные значения уровней — по степени экологического бедствия. Кроме того, динамика уровня экологичности территории позволяет судить об изменении экологической ситуации на ней за длительные промежутки времени, определить зоны экологического бедствия (демографического кризиса) или благополучия.

Источники и факторы экологического риска приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Источники и факторы экологического риска

Источник экологического риска	Наиболее распространенный фактор экологического риска
Антропогенное вмешательство в природную среду	Разрушение ландшафтов при добыче полезных ископаемых; образование искусственных водоемов; интенсивная мелиорация; истребление лесных массивов
Техногенное влияние на окружающую природную среду	Загрязнение водоемов, атмосферного воздуха вредными веществами, почвы — отходами производства; изменение газового состава воздуха; энергетическое загрязнение биосферы
Природное явление	Землетрясение, извержение вулканов, наводнение, ураган, ландшафтный пожар, засуха

Социальный риск характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений и преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу — это риск для группы или сообщества людей. Оценить его можно, например, по динамике смертности, рассчитанной на 1000 человек соответствующей группы:

$$R_C = \frac{1000 \cdot (C_2 - C_1)}{L} \cdot (t),$$

где: R_C — социальный риск;

C_1 — число умерших в единицу времени t (смертность) в исследуемой группе в начале периода наблюдения, например до развития чрезвычайных событий;

C_2 — смертность в той же группе людей в конце периода наблюдения, например на стадии затухания чрезвычайной ситуации;

L — общая численность исследуемой группы.

Источники и наиболее распространенные факторы социального риска приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Источники и факторы социального риска

Источник социального риска	Наиболее распространенные факторы социального риска
Урбанизация экологически неустойчивых территорий	Поселение людей в зонах возможного затопления, образования оползней, селей, ландшафтных пожаров, извержения вулканов, повышенной сейсмичности региона
Промышленные технологии и объекты повышенной опасности	Аварии на АЭС, ТЭС, химических комбинатах, продуктопроводах и т. п. Транспортные катастрофы. Техногенное загрязнение окружающей среды
Социальные и военные конфликты	Боевые действия. Применение оружия массового поражения
Эпидемии	Распространение вирусных инфекций
Снижение качества жизни	Безработица, голод, нищета. Ухудшение медицинского обслуживания. Низкое качество продуктов питания. Неудовлетворительные жилищно-бытовые условия

Экономический риск определяется соотношением пользы и вреда, получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности:

$$R_{\mathcal{E}} = \frac{B}{\Pi} \cdot 100, \quad (2.1.9)$$

где: $R_{\mathcal{E}}$ — экономический риск, %;

B — вред обществу от рассматриваемого вида деятельности;

Π — польза.

В общем виде:

$$B = Z_{\mathcal{E}} + Y, \quad (2.1.10)$$

где: Z_6 — затраты на достижение данного уровня безопасности;
 $У$ — ущерб, обусловленный недостаточной защищенностью человека и среды его обитания от опасностей.

Чистая польза, т. е. сумма всех выгод (в стоимостном выражении), получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности:

$$\Pi = D - Z_6 - B > 0 \text{ или } \Pi = D - Z_n - Z_6 - У > 0, \quad (2.1.11)$$

где: D — общий доход, получаемый от рассматриваемого вида деятельности;

Z_n — основные производственные затраты.

Формула экономически обоснованной безопасности жизнедеятельности имеет вид:

$$У < D - (Z_n + Z_6). \quad (2.1.12)$$

В условиях хозяйственной деятельности необходим поиск оптимального отношения затрат на безопасность и возможного ущерба от недостаточной защищенности. Найти его можно, если задаться некоторым значением реально достижимого уровня безопасности производства K_{6n} . Эту задачу можно решить методом оптимизации.

Использование рассматриваемых видов риска позволяет выполнять поиск оптимальных решений по обеспечению безопасности как на уровне предприятия, так и на макроуровнях в масштабах инфраструктур. Для этого необходимо выбирать значения приемлемого риска.

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т. е. можно говорить о снижении индивидуального, технического или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

2.2. Развитие риска на промышленных объектах

На процесс зарождения и развития риска оказывает свое влияние многообразие факторов и условий, характерных для промышленной системы (рис. 2.1). Знакомство с приведенной схемой позволяет выделить целый ряд первопричин риска: отказы в работе узлов и оборудования вследствие их конструктивных недостатков, плохого технического изготовления или нарушения правил технического обслуживания; отклонения от нормальных условий эксплуатации; ошибки персонала; внешние воздействия и пр. Вследствие возможности возникновения указанных причин опасные промышленные объекты постоянно находятся в неустойчивом состоянии, которое по отношению к безопасности производства становится особенно критичным при возникновении аварийных ситуаций на объектах.

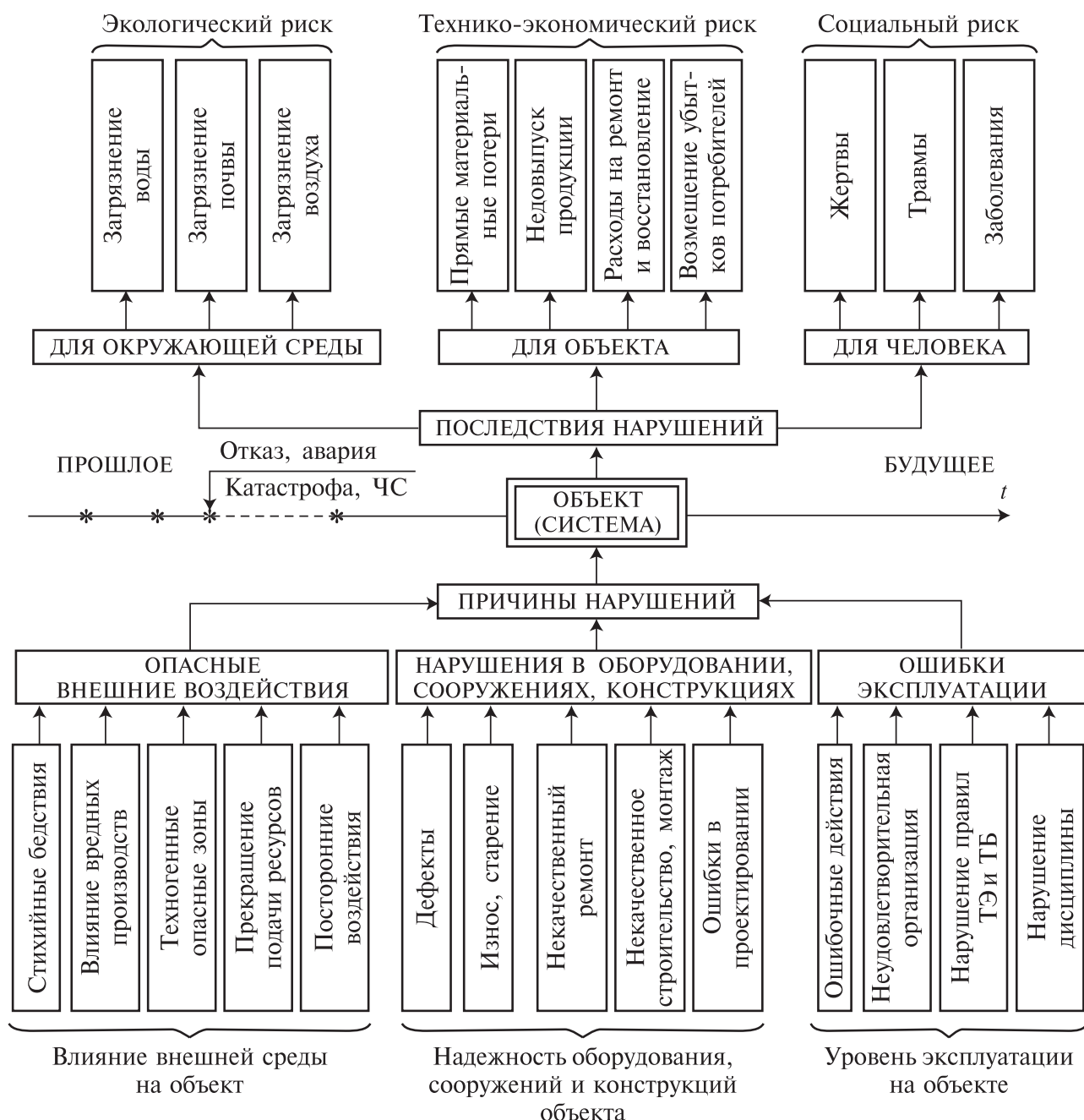


Рис. 2.1. Функциональная модель развития риска

Риск возникает при следующих необходимых и достаточных условиях:

- существование фактора риска (источника опасности);
- присутствие данного фактора риска в определенной, опасной (или вредной) для объектов воздействия дозе;
- подверженность (чувствительность) объектов воздействия к факторам опасностей.

Между авариями в самых разных отраслях можно заметить явное сходство. Обычно аварии предшествует накопление дефектов в оборудовании или отклонение от нормального хода процессов. Эта фаза может длиться минуты, сутки или даже годы. Сами по себе дефекты или отклонения еще не приводят к аварии, но готовят почву для нее. Операторы, как правило, не замечают этой фазы из-за невнимания к регламенту или недостатка информации о работе объекта, так что у них не возникает чувства опасности. На следующей фазе происходит неожиданное или редкое событие, которое существенно меняет ситуацию. Операторы пытаются восстановить нормальный ход технологического процесса, но, не обладая полной информацией, зачастую только усугубляют развитие аварии. Наконец, на последней фазе еще одно неожиданное событие — иногда совсем незначительное — играет роль толчка, после которого техническая система перестает подчиняться людям, и происходит катастрофа.

Риск является неизбежным, сопутствующим фактором промышленной деятельности. Риск объективен, для него характерны неожиданность, внезапность наступления, что предполагает прогноз риска, его анализ, оценку и управление — ряд действий по недопущению факторов риска или ослаблению воздействия опасности.

2.3. Основы методологии анализа и управления риском

2.3.1. Анализ риска: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем

При разработке проблем риска и обеспечении безопасности технических систем самое пристальное внимание уделяется системному подходу к учету и изучению разнообразных факторов, влияющих на показатели риска, именуемому анализом риска.

Анализ риска, или риск-анализ (risk analysis), — процесс идентификации опасностей и оценки риска для отдельных лиц, групп населения, объектов, окружающей природной среды и других объектов рассмотрения.

Напомним, что под опасностью понимается источник потенциального ущерба или вреда либо ситуация с возможностью нанесения ущерба, а под идентификацией опасности — процесс выявления и признания, что опасность существует, и определение ее характеристик.

Существует много подобных формулировок этого понятия, но в общем виде под анализом риска подразумевается процесс выявления опасности и оценки возможных негативных последствий в результате возникновения

нарушений в работе конкретных технологических систем и представления этих последствий в количественных показателях.

В США вместо термина «анализ риска» используют «анализ опасностей» (process hazard analysis), имеющий практически то же значение.

Анализ риска — во многом субъективный процесс, в ходе которого учитываются не только количественные показатели, но и показатели, не поддающиеся формализации, такие как позиции и мнения различных общественных группировок, возможность компромиссных решений, экспертные оценки и т. д.

Многообразие видов производственной деятельности, специфика промышленных объектов, их принадлежность к самым различным отраслям отражает многоаспектность проблемы анализа риска.

Особенность анализа риска заключается в том, что в ходе его рассматриваются потенциально негативные последствия, которые могут возникнуть в результате отказа в работе технических систем, сбоев в технологических процессах или ошибок со стороны обслуживающего персонала. Разумеется, что можно рассматривать и негативные воздействия на людей, и окружающую природную среду при безаварийном функционировании производства (за счет выбросов или утечки вредных или опасных веществ, неочищенных стоков и т. д.).

Результаты анализа риска имеют существенное значение для принятия обоснованных и рациональных решений при определении места размещения и проектировании производственных объектов, при транспортировании и хранении опасных веществ и материалов. В процессе анализа риска находят широкое применение формализованные процедуры и учет разнообразных ситуаций, с которыми может столкнуться управляющий персонал в процессе своей деятельности, особенно при возникновении чрезвычайной обстановки. Неопределенность, в условиях которой во многих случаях должны приниматься управленческие решения, накладывает отпечаток на методику, ход и конечные результаты анализа риска. Методы, используемые в процессе анализа, должны быть ориентированы прежде всего на выявление и оценку возможных потерь в случае аварии, стоимости обеспечения безопасности и преимуществ, получаемых при реализации того или иного проекта.

Анализ риска имеет ряд общих положений, независимо от конкретной методики анализа и специфики решаемых задач. **Во-первых**, общей является задача определения допустимого уровня риска, стандартов безопасности обслуживающего персонала, населения и защиты окружающей природной среды. **Во-вторых**, определение допустимого уровня риска происходит, как правило, в условиях недостаточной или непроверенной информации, особенно когда это касается новых технологических процессов или новой техники. **В-третьих**, в ходе анализа в значительной мере приходится решать вероятностные задачи, что может привести к существенным расхождениям в получаемых результатах. **В-четвертых**, анализ риска нужно рассматривать

как процесс решения многокритериальных задач, которые могут возникнуть как компромисс между сторонами, заинтересованными в определенных результатах анализа.

Анализ риска может быть определен как процесс решения сложной задачи, требующий рассмотрения широкого круга вопросов и проведения комплексного исследования и оценки технических, экономических, управленческих, социальных, а в ряде случаев и политических факторов.

Анализ риска должен дать ответы на три основных вопроса:

1. Что плохого может произойти? (Идентификация опасностей).
2. Как часто это может случаться? (Анализ частоты).
3. Какие могут быть последствия? (Анализ последствий).

Основной элемент анализа риска — идентификация опасности (обнаружение возможных нарушений), которые могут привести к негативным последствиям. Выраженный в наиболее общем виде процесс анализа риска может быть представлен как ряд последовательных событий:

1. Планирование и организация работ.
2. Идентификация опасностей.
 - 2.1. Выявление опасностей.
 - 2.2. Предварительная оценка характеристик опасностей.
3. Оценка риска.
 - 3.1. Анализ частоты.
 - 3.2. Анализ последствий.
 - 3.3. Анализ неопределенностей.
4. Разработка рекомендаций по управлению риском.

Первое, с чего начинается любой анализ риска, — это планирование и организация работ. Анализ риска проводится в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов для того, чтобы обеспечить вход в процесс управления риском, однако более точный выбор задач, средств и методов анализа риска обычно не регламентируется. В документах подчеркивается, что анализ опасности должен соответствовать сложности рассматриваемых процессов, наличию необходимых данных и квалификации специалистов, проводящих анализ. При этом более простые и понятные методы анализа следует предпочесть более сложным методам, не до конца ясным и методически необеспеченным. Поэтому на первом этапе необходимо:

- указать причины и проблемы, вызвавшие необходимость проведения риск-анализа;
- определить анализируемую систему и дать ее описание;
- подобрать соответствующую команду для проведения анализа;
- установить источники информации о безопасности системы;
- указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы риск-анализа;
- четко определить цели риск-анализа и критерии приемлемого риска.

Во всех нормативах содержится требование документального оформления этого этапа анализа риска.

Следующий этап анализа риска — идентификация опасностей. Основная задача — выявление (на основе информации о данном объекте, результатов экспертизы и опыта работы подобных систем) и четкое описание всех присущих системе опасностей. Это ответственный этап анализа, так как невыявленные на этом этапе опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению и исчезают из поля зрения.

Существует целый ряд формальных методов выявления опасностей, о которых речь пойдет ниже. Здесь приводится **предварительная оценка** опасностей с целью выбора дальнейшего направления деятельности:

- прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;
- провести более детальный анализ риска;
- выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

Исходные данные и результаты предварительной оценки опасностей также должным образом документируются. В принципе процесс риск-анализа может закончиться уже на этапе идентификации опасностей.

При необходимости после идентификации опасностей переходят к этапу оценки риска.

Наконец, последний этап анализа риска технической системы — разработка рекомендаций по уменьшению уровня риска (управлению риском) в случае, если степень риска выше приемлемой.

По проведенной таким образом работе все нормативные документы предписывают составление отчета, требования к содержанию которого строго сформулированы и касаются перечисленных выше вопросов.

Множественность результатов анализа и возможность компромиссных решений дают основание считать, что анализ риска не является строго научным процессом, поддающимся проверке объективными, научными методами.

2.3.2. Оценка риска: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем

С анализом риска тесно связан другой процесс — оценка риска.

Оценка риска — процесс, используемый для определения величины (меры) риска анализируемой опасности для здоровья человека, материальных ценностей, окружающей природной среды и других ситуаций, связанных с реализацией опасности. Оценка риска — обязательная часть анализа. Оценка риска включает анализ частоты, анализ последствий и их сочетаний.

В англоязычной литературе употребляют термины «risk estimation», «risk assessment», «risk evaluation», зачастую имеющие разные значения, но переводимые как оценка риска.

Оценка риска — этап, на котором идентифицированные опасности должны быть оценены на основе критериев приемлемого риска с целью выделения опасности с неприемлемым уровнем риска, этот шаг послужит основой для разработки рекомендаций и мер по уменьшению опасностей. При этом и критерии приемлемого риска и результаты оценки риска могут быть выражены как качественно, так и количественно.

Согласно определению, оценка риска включает в себя анализ частоты и анализ последствий. Однако, когда последствия незначительны и частота крайне мала, достаточно оценить один параметр.

Существуют четыре разных подхода к оценке риска.

Первый — инженерный. Он опирается на статистику поломок и аварий, на вероятностный анализ безопасности (ВАБ): построение и расчет так называемых деревьев событий и деревьев отказов — процесс основан на ориентированных графах. С помощью первых предсказывают, во что может развиваться тот или иной отказ техники, а деревья отказов, наоборот, помогают проследить все причины, которые способны вызвать какое-то нежелательное явление. Когда деревья построены, рассчитывается вероятность реализации каждого из сценариев (каждой ветви), а затем — общая вероятность аварии на объекте.

Второй подход, модельный, — построение моделей воздействия вредных факторов на человека и окружающую среду. Эти модели могут описывать как последствия обычной работы предприятий, так и ущерб от аварий на них.

Первые два подхода основаны на расчетах, однако для таких расчетов далеко не всегда хватает надежных исходных данных. В этом случае приемлем **третий подход** — экспертный: вероятности различных событий, связи между ними и последствия аварий определяют не вычислениями, а опросом опытных экспертов.

Наконец, в рамках **четвертого подхода** — социологического — исследуется отношение населения к разным видам риска, например с помощью социологических опросов.

То, что для определения риска используются четыре столь несхожих между собой метода, не должно удивлять. В разных задачах под риском следует понимать то вероятность какой-то аварии, то масштаб возможного ущерба от нее, а то и комбинацию двух этих величин. Описывая риск, нужно учитывать и выгоду, которую получает общество, когда на него идет (бесполезный риск недопустим, даже если он ничтожно мал). Иными словами, величина риска — это не какое-то одно число, а скорее вектор, состоящий из нескольких компонент. И поэтому мы имеем дело с так называемым многокритериальным выбором, процедура которого описывается теорией принятия решений.

Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска. Анализ неопределенностей — необходимая составная часть оценки риска. Как правило, основные источники неопределенностей — информация по надежно-

сти оборудования и человеческим ошибкам, а также допущения применяемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать величины риска, надо понимать неопределенности и их причины. Анализ неопределенности — это перевод неопределенности исходных параметров и предложений, использованных при оценке риска, в неопределенность результатов.

Источники неопределенности должны по возможности идентифицироваться. Основные параметры, к которым анализ является чувствительным, должны быть представлены в результатах.

Важно подчеркнуть, что сложные и дорогостоящие расчеты зачастую дают значение риска, точность которого очень невелика. Для сложных технических систем точность расчетов индивидуального риска, даже в случае наличия всей необходимой информации, не выше одного порядка. При этом проведение полной количественной оценки риска более полезно для сравнения различных вариантов (например, размещения оборудования), чем для заключения о степени безопасности объекта. Зарубежный опыт показывает, что наибольший объем рекомендаций по обеспечению безопасности вырабатывается с применением качественных (из числа инженерных) методов анализа риска, позволяющих достигать основных целей риск-анализа при использовании меньшего объема информации и затрат труда. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях — и единственно допустимы, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных, сложных и дорогостоящих технических систем.

2.3.3. Управление риском: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем

В исследованиях по проблеме риска возникло отдельное направление работ под общим названием «Управление риском».

Управление риском (risk management) — это часть системного подхода к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба материальным ценностям и окружающей природной среде.

Для процесса управления риском существует несколько названий как в нашей стране (обеспечение промышленной безопасности), так и за рубежом («safety management», «management of process hazards»), которые фактически являются синонимами.

Под этими терминами понимается совокупность мероприятий, направленных на снижение уровня технического риска, уменьшение потенциальных материальных потерь и других негативных последствий аварий. По сути

дела, речь идет о предотвращении возникновения аварийных ситуаций на производстве и мерах по локализации негативных последствий в тех случаях, когда аварии произошли.

Особенностью этого направления является комплексность, включающая в себя различные аспекты — технические, организационно-управленческие, социально-экономические, медицинские, биологические и др.

2.3.4. Общность и различие процедур оценки и управления риском

Общим в оценке риска и управлением риском является то, что они — два аспекта, две стадии единого процесса принятия решения (в широком смысле слова), основанного на характеристике риска. Такая **общность обусловлена** их главной **целевой функцией** — **определением приоритетов действий, направленных на уменьшение риска до минимума**, для чего необходимо знать как его **источники и факторы** — (**анализ риска**), так и наиболее эффективные пути его сокращения (**управление риском**).

Взаимосвязь между оценкой риска и его управлением представлена на рис. 2.2.

Основное различие между двумя понятиями заключается в том, что **оценка риска строится на фундаментальном, прежде всего естественнонаучном и инженерном, изучении источника** (например, химического объекта) **и факторов риска** (например, загрязняющих веществ с учетом особенностей конкретной технологии и экологической обстановки) и механизма взаимодействия между ними. **Управление риском опирается на экономический и социальный анализ, а также на законодательную базу**, которые не нужны и не используются при оценке риска. Управление риском имеет дело с анализом альтернатив по минимизации риска, т.е. является, по сути дела, частным случаем класса многокритериальных задач принятия решения в условиях неопределенности. **Оценка риска служит основой для исследования и разработки мер управления риском** в соответствии с алгоритмом действий (рис. 2.2).

Заключительная фаза процедуры оценки риска — характеристики риска — одновременно является первым звеном процедуры управления риском.

2.3.5. Количественные показатели риска

Для управления риском его необходимо проанализировать и оценить. Ввиду данного в 2.1 определения риска, его количественный показатель представляет собой численные значения вероятности наступления нежелательного события или (и) результатов нежелательных последствий (ущерба).

Количественно риск может быть определен как частота (размерность — обратное время) реализации опасности.

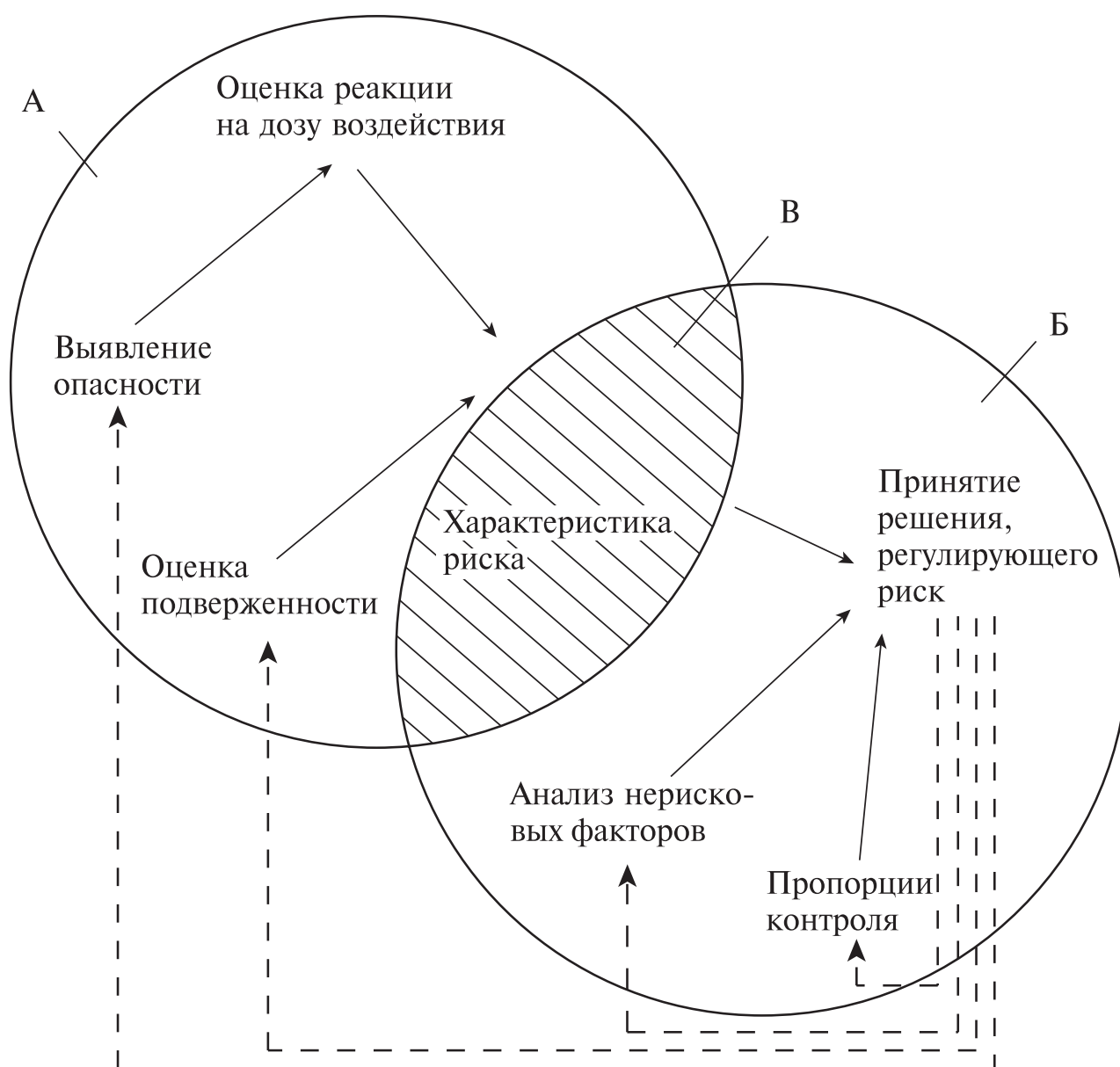


Рис. 2.2. Взаимосвязь между оценкой и управлением риском:

А — область оценки риска; Б — область управления риском;

В — область характеристики риска;

непрерывные линии — прямые связи между элементами оценки и управления риском;

пунктирные линии — обратные связи принятия решения с другими элементами оценки и управления риском

Изучение статистических данных позволяет выявить частоту возникновения опасных событий. Однако серьезность событий (даже внутри одного класса аварий) может значительно изменяться от события к событию; тогда возникает необходимость введения категорий событий (например, события с тяжелыми, средними или легкими последствиями) и рассмотрения частоты каждой из таких категорий. Последнее достигается приписыванию каждому классу или подклассу показателя риска (числа событий за определенный период времени, деленный на длительность этого периода), имеющего размерность обратного времени. Этот показатель иногда рассматривается как мера «вероятности» возникновения события. Следует рассмотреть заме-

чение, сделанное по этому поводу редакторами перевода [38], смысл которого состоит в том, что наиболее естественно интерпретировать вводимый показатель в рамках некоторой математической модели, в данном случае — вероятностной, поскольку рассматриваются случайные явления. Например, можно характеризовать явление случайной величиной — обозначим ее z — числом случаев возникновения события (реализации явления) за определенный период времени T , например за год. Хорошо известно, что математическое ожидание M_z случайной величины z — это среднее (ожидаемое) число случаев возникновения события за год или частота возникновения события. Тогда в соответствии с принятой в математической статистике терминологией число событий (которое берется из статистических данных) — это выборка, отношение числа событий к длительности периода наблюдения — статистика, являющаяся, очевидно, несмещенной и состоятельной оценкой математического ожидания M_z , или частоты возникновения событий. Если считать распределение случайной величины z , например пуассоновским, т. е. если положить $P(z = k) = e^{-r \cdot T} \cdot (r \cdot T)^k / k!$, где r — константа, то возможно оценить условия, когда вводимый показатель можно считать вероятностью. В самом деле, для пуассоновского распределения $M_z = r \cdot T$. С другой стороны, для пуассоновского распределения вероятность того, что за время T случится не менее одного события, равна $1 - e^{-r \cdot T}$. Поэтому только для очень малых частот возникновения события можно интерпретировать вводимый показатель как вероятность возникновения за время T хотя бы одного события.

Необходимо, однако, отметить, что вводимый таким способом показатель не является вероятностью в точном, математическом, смысле этого слова. Вероятностью (события в конечной схеме при классическом определении) называется отношение мощности множества элементарных исходов, составляющих это событие, к мощности всего множества элементарных исходов. Вероятность события — это действительное число, лежащее в интервале 0—1. Так, например, при бросании обычной кости вероятность события «выпадение 7» равна нулю, вероятность события «выпадения 1 или 2» равна одной шестой, вероятность события «выпадение какого-нибудь числа между 1 и 6» равна единице. Таким образом, в рассмотренном случае те связи между событиями A и B , когда только при возникновении A случается B , можно интерпретировать как вероятность.

Количественно риск может быть определен, как вероятность P возникновения события B при наступлении события A (безразмерная величина, лежащая в пределах 0—1).

Поскольку реализация опасности явление случайное, риск опасности (как бы ни определять его — как частоту или вероятность) есть числовая характеристика соответствующей случайной величины, используемой для

описания данной опасности. В качестве простейшего примера возможного формального подхода рассмотрим случайную величину s — длительность периода безаварийной работы промышленного предприятия, областью определения которой служит множество режимов эксплуатации за произвольное (возможно, бесконечное) время. Оказывается возможным явно вычислить функцию распределения этой величины $F_s(t) = P(s \leq t)$, предположив ее независимость от предыстории функционирования промышленного предприятия (такое предположение является наиболее оптимистичным в отношении уровня безопасности). Хорошо известно, что существует единственное решение, удовлетворяющее сформулированному условию: $F_s(t) = 1 - e^{-q \cdot t}$ для $t > 0$; $F_s(t) = 0$ для $t < 0$, где $p > 0$ — постоянная; это так называемое показательное распределение. Математическое ожидание M_s случайной величины s есть $M_s = 1/p$, что позволяет интерпретировать параметр p как среднюю (ожидаемую) частоту аварий или риск аварий в смысле обсуждаемого определения. Вероятность аварий p_T за период времени, не превосходящий T , определяется, очевидно, как $p_T = P(s \leq T) = 1 - e^{-q \cdot T}$. Отметим, что всегда $p_T < p \cdot T$, поэтому неверно часто высказываемое утверждение, что для аварии, риск которой равен $1/T$, она обязательно случится за период T (вероятность такого события равна $1 - e^{-1}$, т. е. приблизительно 0,632). Более того, даже в этом простейшем случае показательного распределения было бы неверно утверждать, что вероятность аварии p_T за период времени, меньший или равный T , определяется, как произведение частоты аварии p на этот период T . Имеет место лишь приблизительное равенство в случае малых рисков, т. е. редких аварий. Однако функциональная зависимость между вероятностью аварий и частотой ее возникновения (для фиксированного распределения) существует.

Последствие Y в виде нежелательного события или ущерба может в соответствии со своей величиной описываться своими специфическими параметрами. Диапазон при этом может быть весьма широк — от экономических до этических ценностей и человеческих жертв.

Мерой возможности наступления риска R служит вероятность его наступления P .

Отсюда следует: $R = Y \cdot P$.

Величина риска определяется как произведение величины нежелательного события на вероятность его наступления, т. е. как математическое ожидание величины нежелательных последствий.

Обратимся вновь к функциональной модели (рис. 2.1). Для отображенных на ней множества исходных причин развития риска можно в общем виде записать формулу расчета в виде:

$$R = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4, \quad (2.3.1)$$

где: R — риск, т. е. вероятность нанесения определенного ущерба;

- P_1 — вероятность возникновения события или явления, обуславливающего формирование и действие опасных факторов;
- P_2 — вероятность формирования определенных уровней физических полей, ударных нагрузок, полей концентрации вредных веществ, воздействующих на людей и другие объекты;
- P_3 — вероятность того, что указанные уровни полей и нагрузок приводят к определенному ущербу;
- P_4 — вероятность отказа средств защиты.

Мы узнали, что количественная мера риска может выражаться не только вероятностной величиной. Риск иногда интерпретируют как математическое ожидание ущерба, возникающего при реализации опасностей.

При определении математического ожидания величины ущерба представляется целесообразным принимать во внимание все возможные виды опасных происшествий для данного объекта и оценку риска производить по сумме произведений вероятностей указанных событий на соответствующие ущербы. В этом случае справедлива следующая зависимость:

$$R_{MO} = \sum_{i=1}^n P_i Y_i, \quad (2.3.2)$$

где: R_{MO} — уровень риска, выраженный через математическое ожидание ущерба;

P_i — вероятность возникновения опасного события i -го класса;

Y_i — величина ущерба при i -м событии.

Хотя последняя интерпретация находит применение, однако вероятностная мера риска является более удобной и применяемой при решении широкого круга задач научного и практического характера, в особенности задач, касающихся промышленной безопасности.

Понятие «риск» — атрибут научного аппарата многих технических, экономических, общественных и естественных наук. У каждого из них свой предмет, свой аспект, а потому в определении меры риска в безопасности выделяют социальные, профессиональные, экологические, техногенные, медико-биологические, военные и др. опасности. Таким образом, **риск — мера вполне определенных опасностей**. Определяя риск, необходимо ответить на вопрос: риск чего? (Например, риск событий, связанных с эксплуатацией сложной технической системы — разгерметизацией оборудования, отказом средств предупреждения, ошибками человека и т. д.).

На рисунке 2.3 дан обзор ситуаций с риском возникновения соответствующих нежелательных событий и приведены их измерения.

При угрозе материальным ценностям риск часто измеряют в денежном выражении. Если различные последствия нежелательного события одинаковы или очень велики, то для сравнения достаточно рассматривать одни соответствующие вероятности. Наряду с этим может возникнуть угроза, которую нельзя выразить количественно, например, когда последствия события нельзя предусмотреть достаточно полно. Примером могут служить

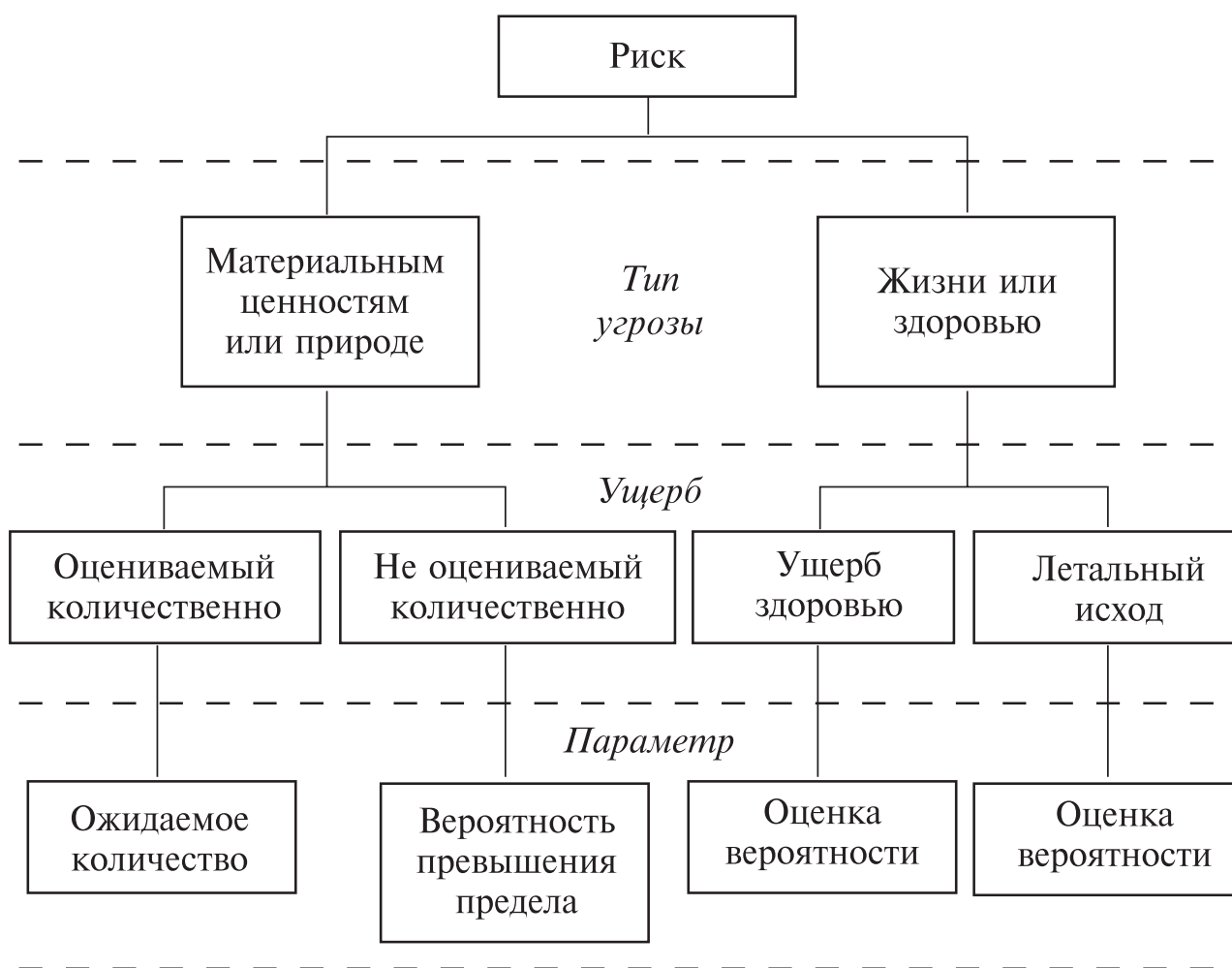


Рис. 2.3. Обзор ситуаций риска

последствия выхода из строя прибора (установки и т. д.), используемого в различных областях народного хозяйства, которые поставщик оценить не может. В этом случае мерой риска остается принять вероятность превышения предела нагрузки на систему, где эксплуатировали прибор. При риске, связанном со здоровьем, последствия могут быть частично оценены количественно в таких категориях, как простой в работе или расходы на оплату подменяющего персонала и т. п., страховые выплаты. При риске, связанном с летальным исходом, количественные оценки последствий в большинстве случаев отсутствуют. Особые проблемы ставят случаи, когда опасность грозит и материальным ценностям, и людям, и окружающей природе одновременно, и желательно меру такого риска оценить по нескольким компонентам.

Как уже говорилось, риск может быть явно связан с факторами, не поддающимися учету. Так, эстетический вред, наносимый построенным сооружением уникальному ландшафту, или последствия выхода из строя телецентра практически невозможно оценить.

Как и в случае других измерений, для риска могут использоваться единицы измерения, выраженные и через фундаментальные величины.

2.3.6. Приемлемый риск

Традиционный подход к обеспечению безопасности при эксплуатации технических систем и технологий базируется на концепции «абсолютной безопасности» — ALAPA (аббревиатура от «As Low As PracticabLe AchievabLe»: «настолько низко, насколько это достижимо практически»). То есть внедрение всех мер защиты, которые практически осуществимы. Как показывает практика, такая концепция не адекватна законам техносферы. Эти законы имеют вероятностный характер, и абсолютная безопасность достигается лишь в системах, лишенных запасенной энергии. Требование абсолютной безопасности, подкупающее своей гуманностью, оборачивается трагедией для людей, потому что обеспечить нулевой риск в действующих системах невозможно, и человек должен быть ориентирован на возможность возникновения опасной ситуации, т. е. ориентирован на соответствующий риск.

Современный мир отверг концепцию абсолютной безопасности и пришел к концепции «приемлемого» (допустимого) риска. То есть если нельзя создать абсолютно безопасные технологии, обеспечить абсолютную безопасность, то, очевидно, следует стремиться к достижению хотя бы такого уровня риска, с которым общество в данное время сможет смириться. В силу этих обстоятельств в промышленно развитых странах начиная с конца 70-х — начала 80-х гг. в исследованиях, связанных с обеспечением безопасности, начался переход от концепции «абсолютной» безопасности к концепции «приемлемого» риска. Степень внедрения этой концепции в практическую деятельность сегодня различна в разных странах и в некоторых из них уже введена в законодательство. Например, в Нидерландах эта концепция в 1985 г. была принята парламентом страны в качестве государственного закона. Согласно ему, вероятность смерти в течение года для индивидуума от опасностей, связанных с техносферой, более 10^{-6} считается недопустимой, а менее 10^{-8} — пренебрежимой. «Приемлемый» уровень риска выбирается в диапазоне 10^{-6} — 10^{-8} в год, исходя из экономических и социальных причин. Для сравнения: риск смерти человека, равный 10^{-6} , соответствует риску, которому он подвергается в течение своей поездки на автомобиле на расстояние в 100 км, или полете на самолете на расстояние 650 км, или если он выкуривает 3/4 сигареты, или в течение 15 мин. занимается альпинизмом и т. д.

В Нидерландах при планировании промышленной деятельности наряду с географическими, экономическими и политическими картами используются карты риска для территории страны. В этих условиях, чтобы построить промышленное предприятие и ввести его в эксплуатацию, проектировщикам требуется количественно определить уровень риска его эксплуатации и доказать правительственным органам приемлемость этого риска. При лицензировании нового крупного промышленного предприятия также требуется предоставить топографическую карту риска, которому будет подвер-

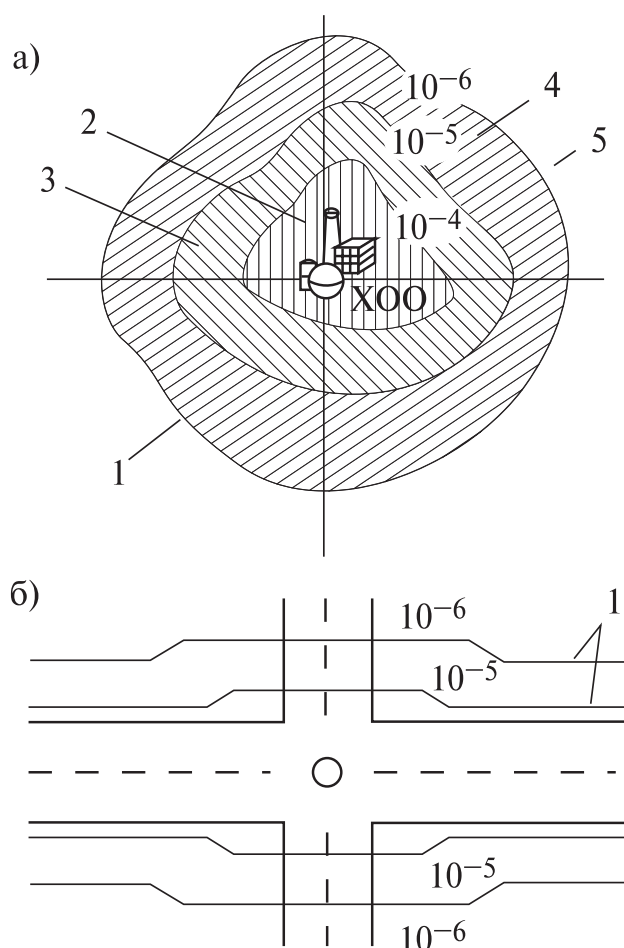


Рис. 2.4. Построение зон индивидуального риска для опасного предприятия (а) и транспортной магистрали (б), по которой осуществляется перевозка опасных грузов:
 1 — изолинии равного риска;
 2, 3, 4, 5 — зона соответственно чрезвычайно высокого, высокого, приемлемого и низкого риска

гаться человек, оказавшийся в зоне расположения этого предприятия. На этой карте должны быть указаны замкнутые кривые равного риска, каждая из которых соответствует следующим численным значениям вероятности смерти индивидуума в течение года: 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} (рис. 2.4). Требования такого же рода предъявлены и к уже действующим предприятиям.

Проблема уменьшения риска решается в Нидерландах настолько активно и последовательно, насколько это возможно при нынешнем уровне знаний. Основные принципы такой деятельности закреплены в правительственной программе управления риском, которая является составной частью общей программы по защите окружающей среды.

Эксперты стараются определить риск всесторонне. Учитывают индивидуальный риск, социальный риск и даже риск для экосистем. Первый задается вероятностью гибели отдельного человека, второй — соотношением между количеством людей, которые могут погибнуть при одной аварии, и вероятностью такой аварии, а третий — процентом биологических видов экосистемы, на кото-

рых скажется вредное воздействие. Рассматриваются не только события, приводящие к мгновенной смерти, но и факторы, дающие отдаленные последствия — например, использование пестицидов в сельском хозяйстве или загрязнение окружающей среды. Разработаны сложные комплексы компьютерных программ, способные вычислить вероятность аварии на предприятии, определить величину и характер опасных выбросов, учесть метеорологические условия, рельеф местности, расположение дорог и населенных пунктов и в конечном счете построить карту распределения риска.

Существует уровень риска, который можно считать пренебрежимо малым. Если риск от какого-то объекта не превышает такого уровня, нет смысла принимать дальнейшие меры по повышению безопасности, поскольку это потребует значительных затрат, а люди и окружающая среда из-за

действия иных факторов все равно будут подвергаться почти прежнему риску. С другой стороны, есть уровень максимального приемлемого риска, который нельзя превосходить, каковы бы ни были расходы. Между двумя этими уровнями лежит область, в которой и нужно уменьшать риск, отыскивая компромисс между социальной выгодой и финансовыми убытками, связанными с повышением безопасности.

Решение о том, какой уровень риска считать приемлемым, а какой нет, носит не технический, а политический характер и во многом определяется экономическими возможностями страны. Так, правительство и парламент Нидерландов законодательно установили такие уровни. Максимальным приемлемым уровнем индивидуального риска считается величина 10^{-6} в год. Иными словами, вероятность гибели человека в течение года не должна превышать одного шанса из миллиона. Пренебрежимо малым считается индивидуальный риск 10^{-8} в год. Для факторов, которые приводят к отдаленным опасным последствиям и не имеют порога действия, приняты эти же нормы. Если такие факторы сказываются лишь на превышении порога (например, предельно допустимой концентрации вредного вещества), то максимальный приемлемый уровень риска соответствует порогу. Максимальным приемлемым уровнем риска для экосистем считается тот, при котором может пострадать 5 % видов биогеоценоза.

Два конкретных примера того, как работают такие нормы на практике. Голландская компания *GeneraL ELeetric PLastics* обратилась за разрешением на расширение производства на одном из своих заводов. На этот завод по железной дороге привозилось примерно 600 т хлора в неделю, а в качестве промежуточного реактива использовался фосген. Жители расположенного в 600 м поселка возражали против такого разрешения, поскольку боялись увеличения риска катастрофы. Эксперты провели расчет, и оказалось, что вклад фосгена в общий риск, создаваемый заводом, совсем невелик. Зато расширение завода неминуемо приводило к увеличению объемов хранения и перегрузки хлора, в результате чего значительная часть поселка могла оказаться в зоне, где риск превышал 10^{-7} . Из этой ситуации был найден довольно неожиданный выход: чтобы сделать завод более безопасным, требовалось не просто расширить его, но и начать собственное производство хлора. Тогда исчезла бы угроза, связанная с перевозкой и хранением этого ядовитого газа, и общая безопасность предприятия даже возросла бы. Такой выход устроил и местные власти, и руководителей компании.

Другой случай произошел на юго-востоке Голландии, где расположено крупное химическое предприятие, выпускающее среди прочего до полумиллиона тонн аммиака и акрилонитрита в год и отстоящее от ближайших поселков всего на 200 м. Когда местные власти предложили план застройки местности между поселком и предприятием, по существующим правилам был проведен анализ уровня риска в этой зоне. На территории завода находилось около 35 различных объектов, 10 из которых вносили главный вклад в общую угрозу. Каждый из них был тщательно изучен. Неожиданно обна-

ружилось, что многие считавшиеся раньше весьма опасными установки на самом деле не играют той роли, которую им приписывали. Зато недооценивалась опасность, связанная с хранилищами аммиака. Выяснилось, что часть новой застройки попадает в зону с высоким уровнем риска. Эксперты дали две рекомендации: руководству завода принять меры по снижению риска, местным властям ограничить строительство на территориях, примыкающих к заводу. Жители поселков с энтузиазмом приняли первую часть рекомендаций и с негодованием — вторую. После обсуждения в парламенте было решено в этот раз позволить строительство в зоне, где риск не превышает 10^{-6} , но в будущем ориентироваться на линию, на которой риск составляет 10^{-8} , то есть пренебрежимо мал.

Специалисты из разных стран спорят о том, насколько правильны и объективны используемые в Нидерландах методы расчета, насколько точны их карты, насколько оправдан поиск компромисса между выгодой и безопасностью. Рядовым жителям — неспециалистам, судить об этом трудно. Зато они чувствуют, что государство не на словах, а на деле заботится об их жизни, так что они могут доверять самому подходу к проблеме — честному и действенному.

Конечно, Нидерланды надо рассматривать как пример страны, где наиболее широко используются вероятностные методы в практической деятельности по обеспечению безопасности населения от риска при эксплуатации промышленных объектов. В других странах масштабы использования концепции «приемлемого» риска в законодательстве более ограничены, но во всех этих странах существует тенденция к ее все более полному применению (см. табл. 2.6). Например, в ФРГ концепция «приемлемого» риска является базовой, на которой развиваются научные основы в области безопасности. Полученные при этом результаты используются для повышения безопасности и минимизации риска, а не для достижения общественного признания определенной технологии.

2.3.7. Сравнение рисков

Ключевым значением в установлении допустимого риска является идея, предложенная Фармером в 1967 году [68]. Смысл заключался в установлении случайной зависимости между средним количеством радиоактивной утечки в атмосферу из ядерного реактора и вероятностью (средняя частота в год) наступления такого события.

Примером использования таких диаграмм может служить график (рис. 2.5), на котором подобные зависимости применяются для сравнения опасностей АЭС и других явлений — как техносферы, так и сил природы. За такими графиками закрепилось название «F/N — диаграмма».

Тот же смысл имеет график с горизонтальной осью N — «число несчастных случаев» и вертикальной осью F — «частота событий» (рис. 2.6).

Таблица 2.6

Критерии приемлемости риска в пяти странах

Страна	Определение приемлемости надзорными органами	Требуемое обоснование	Использование количественных оценок риска
Великобритания	Риск должен быть так низок, как практически возможно	Доклад о деятельности, определенной нормативами СИМАН	Предлагаемый риск серьезных аварий 10^{-4} 1/год на границе приемлемости
Германия	Должен удовлетворять техническим правилам и не причинять ущерб окружающей среде или значительный ущерб населению	Анализ безопасности последнего состояния технологии	Только как часть анализа безопасности. Никакие количественные показатели не могут быть удовлетворительно определены
Франция	Реальное арбитражное просвещение	Оценка технического риска и экономический анализ	Риск неприемлемых последствий, который не должен превышать 10^{-6} 1/год, рассматривается скорее как цель, чем требование
Дания	Требования выражены в общих терминах. Загрязнение окружающей среды не выше пороговых значений	Должен быть приемлем для комитета соответствующей организации	Риск, не превышающий 10^{-6} 1/год, приемлем
Нидерланды	Опасность должна быть квантифицирована настолько точно, насколько возможно	Доклад по безопасности должен быть одобрен надзорными органами и рабочим советом. Пригодность операционного персонала должна быть оценена	Анализ в терминах теории вероятности. Обеспечиваемый максимальный приемлемый индивидуальный риск смерти 10^{-6} 1/год

Подобные графики в случае, если количество данных и диапазон их изменений очень велик, обычно строятся в логарифмическом масштабе. Они могут быть аппроксимированы кривой — графиком непрерывной функции.

Таким способом определяется предельная кривая частоты аварийных событий (нежелательных последствий), которая может использоваться прежде всего для сравнения опасностей и в качестве исходных данных проектировщиками и специалистами по безопасности. Считается, что кривая отделяет верхнюю область недопустимо большого риска от области приемлемого риска, расположенной ниже и левее кривой. Кривую, таким образом, можно использовать в качестве критерия безопасности, определяющего верхнюю границу допустимой вероятности. Если это условие выполняется, основная цель достигнута. ***Для рассматриваемых характеристик необходима реальная статистика.***

Из рис. 2.5 и 2.6 видно, что частота и величина риска, связанного с природными катаклизмами, обычно существенно превосходят угрозы, сопутствующие эксплуатации техники. На рис. 2.7 сопоставлены экономические последствия ущерба, наносимого природными катаклизмами и техническими катастрофами.

Поскольку границы оправданного риска трудно рационально обосновать, при решении расчетных или эксплуатационных технических задач следует использовать сравнение с риском в аналогичных ситуациях. При этом в анализе следует принимать во внимание наиболее неблагоприятный случай (правда, чтобы не впадать в крайности, рисуя себе нереальные ужасные картины, необходимо постоянно опираться на здравый смысл). Установленный таким образом крайне неблагоприятный случай угрозы нужно сравнить по частоте и величине с уже ранее имевшими место аналогичными рисками. При этом необходимо учитывать, что на частоту влияют как пространственная, так и временная протяженность рассматриваемых явлений. Кроме того, нужно учитывать продолжительность каждого события и степень стабильности исходных параметров.

Из таблиц 2.7—2.9, а также рис. 2.5 видно, что риск летального исхода существует на уровне 10^{-7} и выше на человека в год. Таким образом, при проектировании и эксплуатации технических устройств риск на уровне 10^{-7} чел./год может быть принят допустимым при следующих условиях:

- проблема риска проанализирована глубоко и всесторонне;
- анализ проведен до принятия решений и подтвержден имеющимися данными в определенном временном интервале;
- после наступления неблагоприятного события анализ и заключение о риске, полученные на основании имевшихся данных, не меняются;
- анализ показывает и результаты контроля все время подтверждают, что угроза не может быть уменьшена ценой оправданных затрат.

Принятую оценку допустимого риска и указанные условия нужно выполнять строго и рассматривать как первый шаг к количественному сравнению. При необходимости в дальнейшем, когда будет накоплено больше

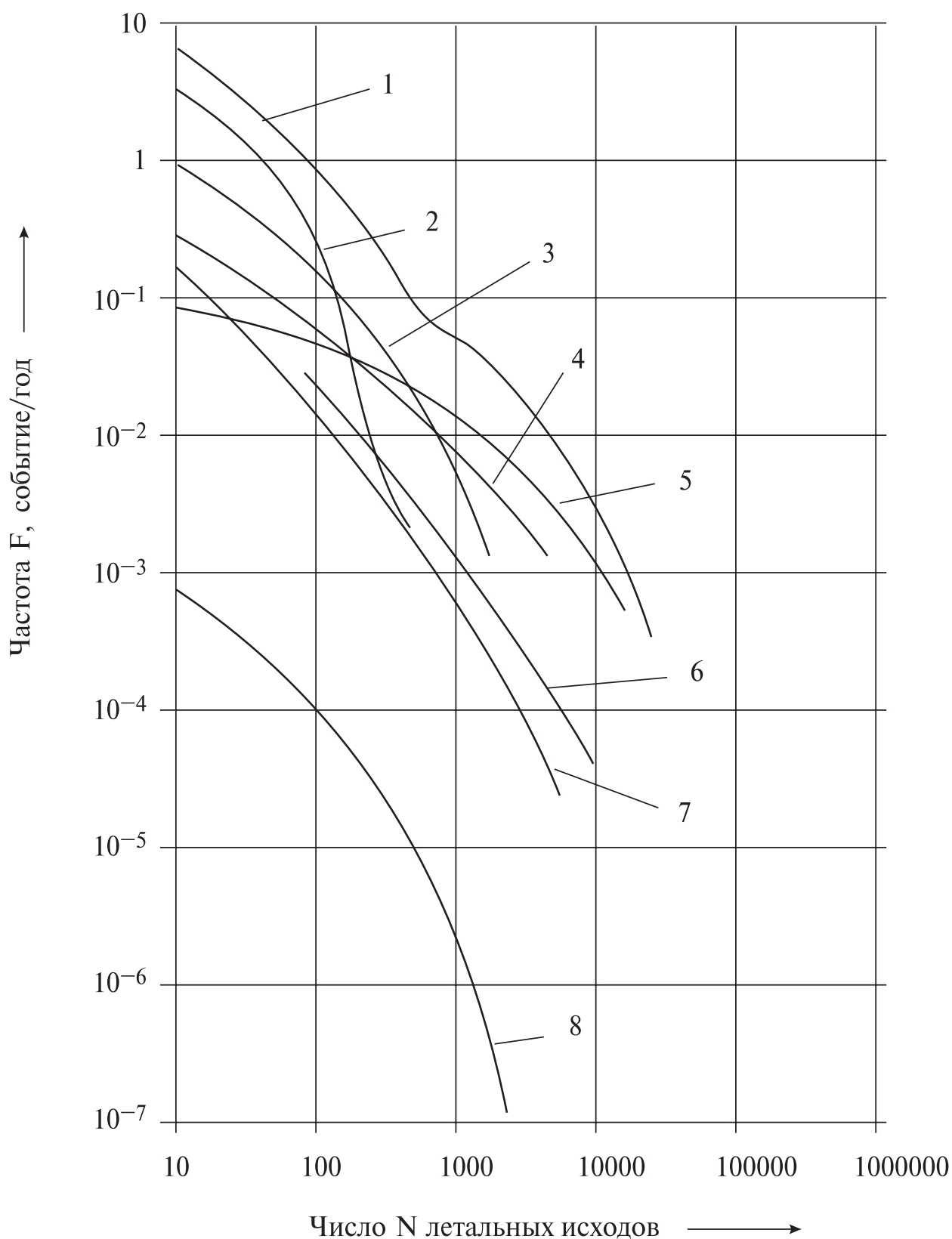


Рис. 2.5. Частота и количество связанных с техникой несчастных случаев:
 1 — суммарная кривая; 2 — общее число аварий самолетов; 3 — пожары;
 4 — взрывы; 5 — прорывы плотин; 6 — выбросы вредных химических веществ;
 7 — аварии самолетов (без пассажиров); 8 — 100 атомных реакторов

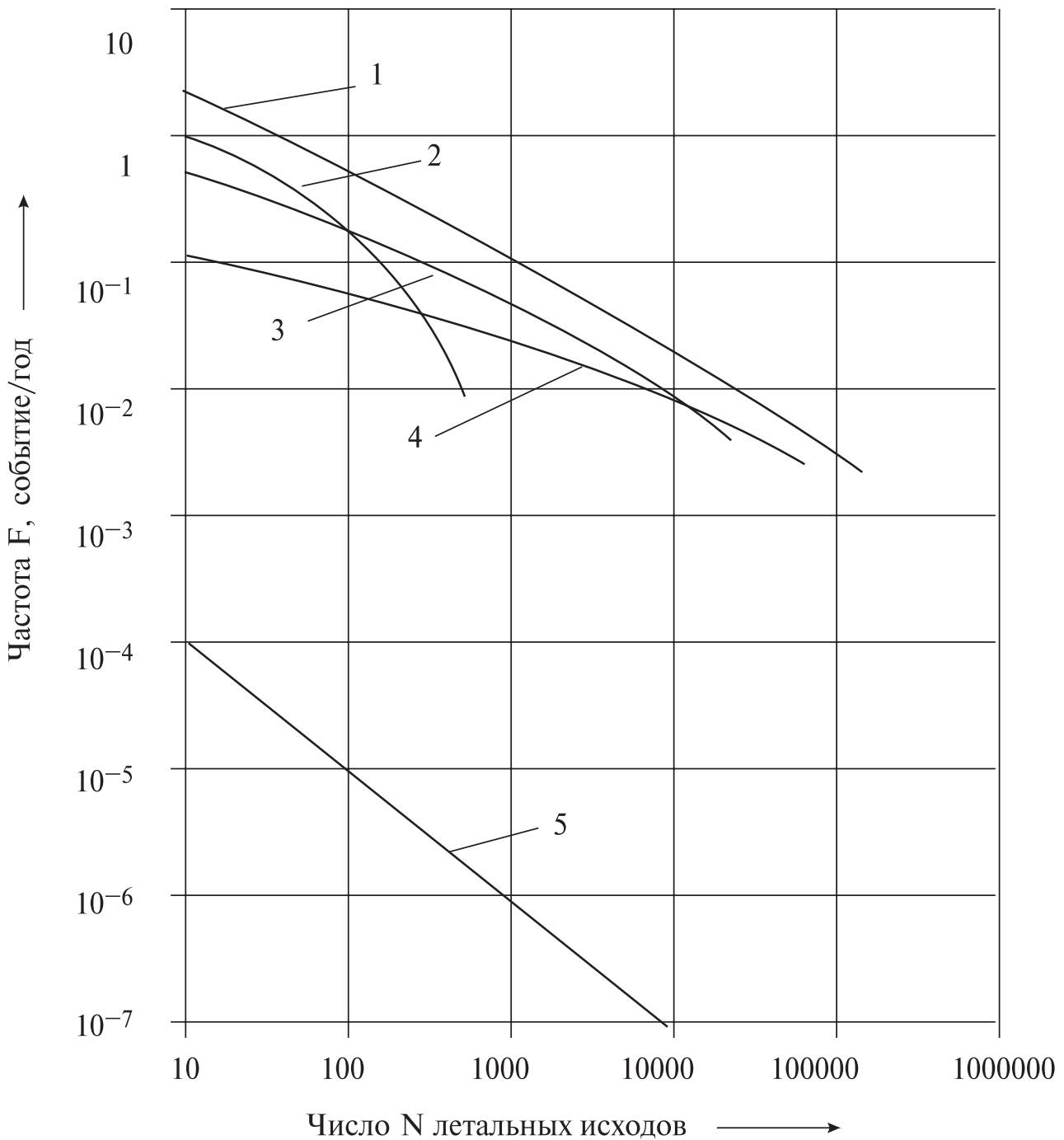


Рис. 2.6. Частота и количество природных катастрофических событий:
 1 — суммарная кривая; 2 — торнадо; 3 — ураганы; 4 — землетрясения;
 5 — падение метеоритов

опыта, эта оценка может быть изменена. Установленную оценку допустимого риска не следует, однако, воспринимать как оправданный предел; она должна служить лишь основой относительной шкалы принимаемых рисков.

Сформулированные положения подтверждают также, что нецелесообразно задавать детерминированную границу риска. Напротив, более приемлемыми параметрами представляются вероятность p_v , отделяющая оправданный риск от условно оправданного, и вероятность p_u , отделяющая условно оправданный риск, т. е. соответствующий определенным условиям,

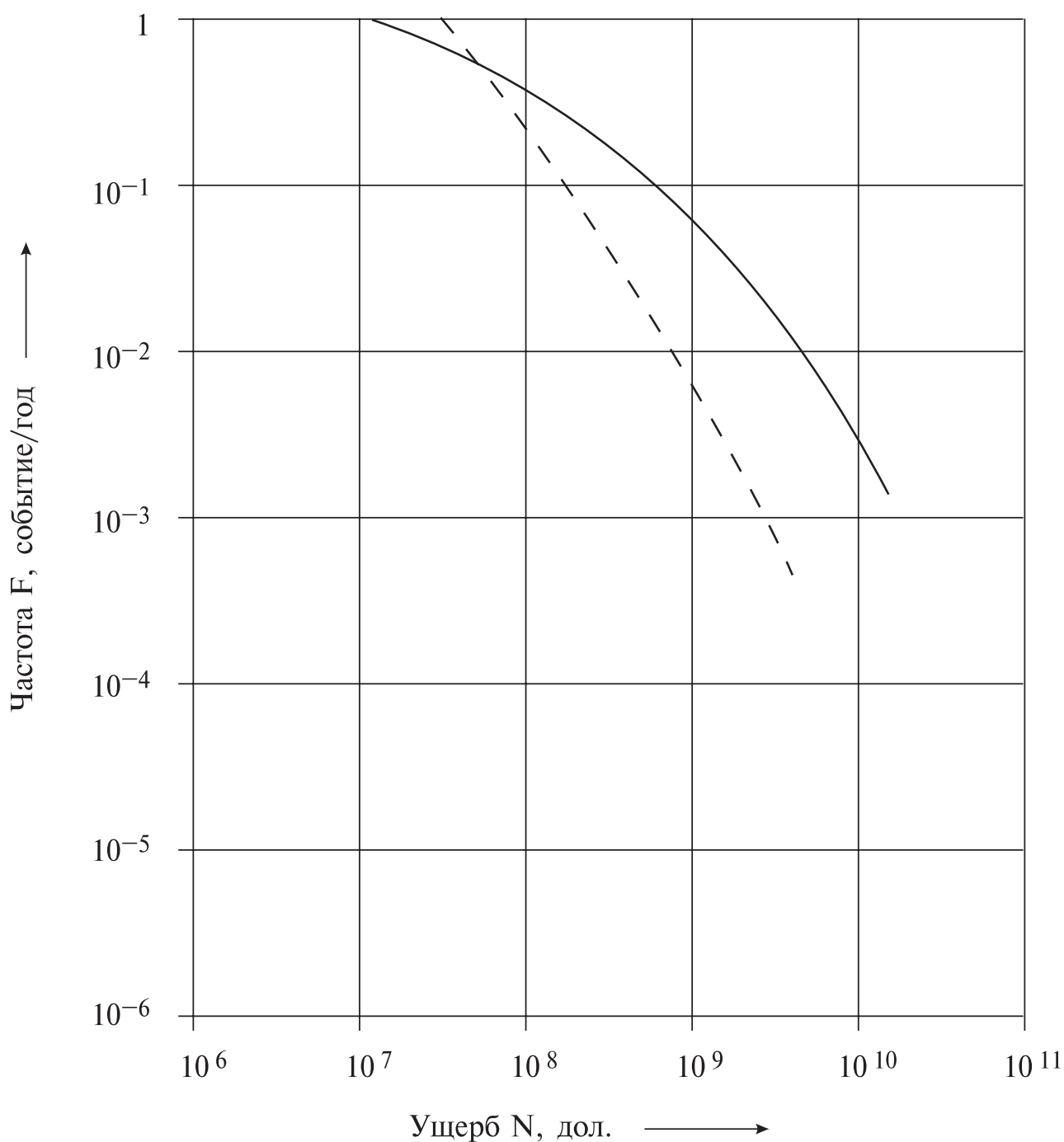


Рис. 2.7. Объем ущерба, наносимого в результате технических и природных катастрофических событий:
 непрерывная линия — природные катаклизмы; пунктирная линия — аварии

от неоправданного. К условиям, при которых летальный риск p_l в диапазоне $p_v < p_l \leq p_u$ может быть допущен, относятся указанные выше четыре требования к анализу риска. Эти требования должен соблюдать принимающий решения, всегда сравнивая изменяющийся риск, например, с повышением максимально допустимой эффективности, исключением неблагоприятных ситуаций и т. п. Для летального риска принимают значения оправданного $p_v = 10^{-8}$ и, с большим безопасным промежутком, неоправданного $p_u = 10^{-5}$ на человека в год; значения эти выглядят разумными.

Таблица 2.7

Вероятность летального исхода

Условия и вид деятельности	10^{-7} чел./год
Аварии автомашин	2 700
Огонь и взрывы	400
Водоемы	280
Обращение с механизмами	100
Воздушное сообщение	75
Электричество	51
Молния	5,5
Общественный транспорт	0,45
Радиоактивное излучение	0,05

Таблица 2.8

Вероятность летального исхода

Отрасль народного хозяйства	10^{-7} чел./ч
Горные работы	3
Транспорт	3
Строительство	2
Добыча нерудных полезных ископаемых	1
Эксплуатация газопроводного оборудования и гидротехнических сооружений	0,6
Металлургическая промышленность	0,6
Деревоотделочные работы	0,6
Пищевая промышленность	0,6
Целлюлозно-бумажная промышленность и печать	0,5
Электротехника, точная механика и оптика	0,4
Химия	0,4
Торговля, финансы, страхование, коммунальные услуги	0,4
Текстильная и кожевенно-обувная промышленность	0,3
Здравоохранение	0,2
Средняя величина для 20,2 млн. застрахованных	0,7

Таблица 2.9

Вероятность летального исхода

Вид деятельности	10^{-7} чел./ч
Профессиональная деятельность	3—0,2
Участие в движении транспорта	10—0,5
Занятие домашним хозяйством и свободное время	0,5
Тяжелые заболевания	3—0,01

Если речь идет исключительно о риске материальных потерь, метод сравнения при оценке риска не вызывает сомнений. В этом случае можно принимать решения, оценивая лишь экономический эффект.

Сравнение данной рискованной ситуации с возникавшими в прошлом аналогичными ситуациями дает для оценки риска более надежные исходные предпосылки, чем субъективные оценки. Проблема оценки этим, однако, все же не решается. В отдельных случаях, конечно, можно довольствоваться требованием, чтобы допустимый риск был заведомо ниже риска, ранее имевшего место в аналогичных ситуациях. Но в других случаях, особенно при очень высоком уровне затрат, проблема остается все же нерешенной. Желанию четко выделить допустимые границы вероятности реализации нежелательного события препятствуют следующие положения:

- такого рода границы должны быть независимыми от экономических затрат, так же как аналогичная независимость должна обеспечиваться для достижения безопасности людей и материальных ценностей;
- законодатель должен был бы для подобных границ принимать общее решение, не учитывающее всю специфику частных случаев;
- одно лишь утверждение, что такие границы будут соблюдаться, может освободить принимающего решения от обязанности анализировать ситуацию дальше и еще больше снижать угрозу безопасности людей, а ведь при этом возможны случаи, когда ценой очень небольших затрат опасность может быть еще больше снижена, но этой возможностью пренебрегают, поскольку границы уже установлены;
- утверждение, что определенные границы выдерживаются, предполагает качественное единство данных, что на самом деле недостижимо, т. к. опасность — явление многоаспектное (см. предыдущую главу), при развитии и реализации опасности имеют место проблемы самого различного типа;
- ограничения допустимого риска зависят от времени и меняются с изменениями технических и экономических возможностей общества.

2.3.8. Системно-динамический подход к оценке техногенного риска

Установление уровня приемлемой безопасности и риска представляет довольно сложную задачу. Для ее решения требуется выполнение научного анализа экономических, экологических, демографических и других факторов, определяющих развитие общества, с учетом множества взаимосвязей и взаимозависимостей.

Для обоснования приемлемого риска может оказаться полезным подход, разработанный доктором физ.-мат. наук Кузьминым И. И. [28] при создании методики оптимизации затрат на снижение техногенного риска. Целесообразно изложить этот метод (с некоторыми сокращениями и изменениями) в авторском варианте.

При постановке вопроса об определении приемлемого риска в качестве цели управления выступает состояние здоровья общества, в качестве критерия — средняя продолжительность жизни ($T_{L.E.}$), а в качестве целевой функции — риск смертности (R_s). Чтобы завершить с математической точки зрения постановку задачи об управлении риском (безопасностью), требуется определить управляющие переменные (управление) в целевой функции R_s , изменение которых позволяло бы обеспечивать оптимальность целевой функции. С этой целью напомним определение безопасности и рассмотрим эту проблему в историческом плане.

Безопасность — защита человека от чрезмерной опасности, где опасность — воздействие на человека неблагоприятных и несовместимых с жизнью факторов или снижающих качество жизни (под «качеством» в рамках данного определения следует понимать количество доступных для человека благ, необходимых для жизнедеятельности и удовлетворения духовных потребностей). Природа этих факторов может быть связана как с причинами социально-экономического характера (уровнем питания, образования, здравоохранения, с природными катастрофами и т. д.), так и с причинами техногенного характера (с уровнем загрязнения окружающей среды в результате производственной деятельности, с авариями на производстве и т. д.).

В доисторический период люди, занимающиеся собирательством и охотой, находились во взаимодействии с экосистемами, являясь неотъемлемой ее частью. Риск смерти на этом этапе развития определялся чисто биотическими и абиотическими факторами.

Повышение безопасности, т. е. снижение уровня риска смертности R_s , всегда было одним из ведущих мотивов деятельности людей. Это достигалось развитием экономики, использованием достижений науки и техники и, соответственно, повышением материального уровня жизни, качества питания, медицинского обслуживания, образования, санитарно-гигиенических условий и пр. Недостаток продуктов питания ликвидировался индустриализацией сельского хозяйства, созданием различных видов удобрений почвы. Необходимость в защите от неблагоприятных погодных воздействий обусловила становления строительства, определила потребность в новых видах строительных материалов и энергоисточниках, рост структуры потребления продукции промышленности повлек за собой бурное развитие энерго- и ресурсонасыщенных производств. Другими словами, человечество, развивая экономику, создавало социально-экономическую систему безопасности, т. е. систему защиты от опасностей. С развитием цивилизации риск смерти определяется уже не природными факторами, а уровнем развития экономики и социальными отношениями в обществе.

Как показывают статистические данные (рис. 2.8), в наиболее промышленно развитых странах достигнут и наибольший уровень безопасности (т. е. наибольшая продолжительность жизни или наименьший риск смерти) на данном этапе развития общества. Такой вид риска — социально-экономический ($R_{C.э.}$):

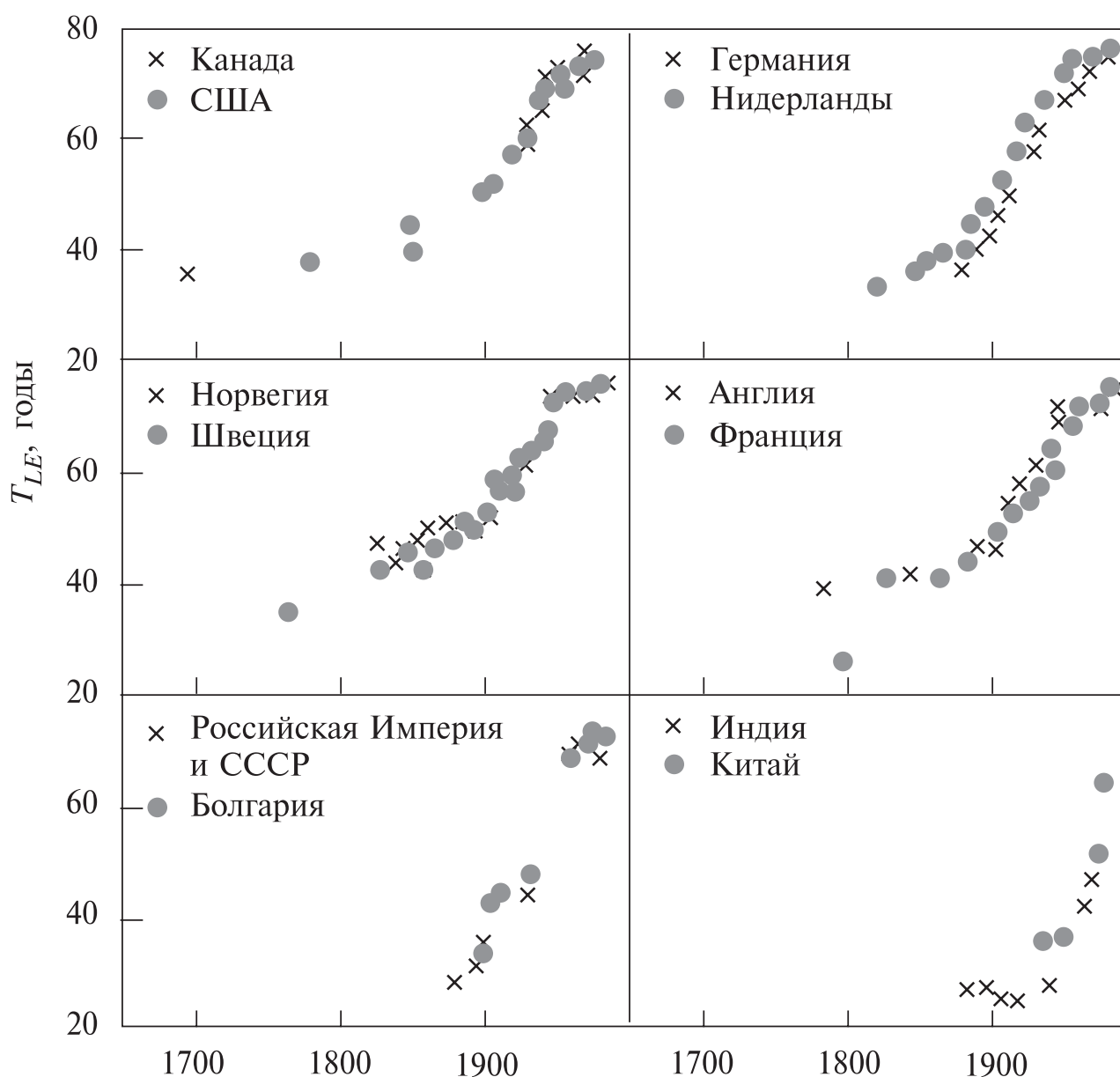


Рис. 2.8. Рост продолжительности жизни в различных странах по мере социально-экономического развития

$$R_S \equiv R_{C.Э.}(C|M, F, S, \dots), \quad (2.3.8.1)$$

где: C — материальные ресурсы общества, характеризующие уровень жизни общества;
 M — материальный уровень жизни;
 F — уровень питания;
 S — уровень медицинского обеспечения и другие показатели социально-экономического развития.

Развитие науки и техники, обусловленное потребностью развития экономики, снижая социально-экономический риск, одновременно привело к появлению новых видов опасности как для здоровья населения, так и для окружающей его среды. Эти опасности техногенного происхождения были вызваны поступлением в окружающую среду отходов промышленного про-

изводства, необходимостью участия человека в профессиональной деятельности, обладающей разнообразными источниками неблагоприятного воздействия на его здоровье. Таким образом, развитие цивилизации привело к возникновению особых условий существования, совокупность которых можно назвать искусственной средой обитания — **техносферой**.

Созданная и развиваемая техносфера накопила в себе большие потенциальные опасности — техногенные факторы, и, соответственно, потребовала создания технических систем безопасности, обеспечивающих защиту от них человека (рис. 2.9).

Необходимость в создании таких технических систем безопасности и одновременно совершенствование социально-экономической системы — это и есть новый элемент в обеспечении безопасности человека и окружающей среды. На их создание и эксплуатацию приходится использовать определенную долю материальных ресурсов общества, отвлекая средства из социально-экономической сферы. Таким образом, возникает важная задача распределения имеющихся материальных ресурсов. **В настоящее время техническая система безопасности не позволяет полностью исключить воздействие техногенных факторов.** В таком случае уровень загрязнения окружающей среды, вызванного недостаточной защищенностью от техногенных факторов, обозначим через Z . Под загрязненностью следует понимать техногенно обусловленное поступление вещества и энергии в среду, окружающую человека, приводящее к ухудшению ее состояния с точки зрения социально-экономических интересов общества. При этом считается, что поступление вещества и энергии может происходить не только в условиях нормальной эксплуатации оборудования и другой промышленной деятельности, но и в результате тех или иных аварийных ситуаций. Техногенный риск, связанный с хозяйственной деятельностью и определяемый уровнем опасности Z , обозначим через R_T :

$$R_T \equiv R_T(D_Z|Z), \quad (2.3.8.2)$$

где: D_Z — экономические затраты на создание и эксплуатацию технических систем безопасности, $D_Z = I_Z C$ (см. рис. 2.8).

Тогда общий риск может быть представлен в виде суммы:

$$R_S(C|M, F, S, \dots Z) = R_{C.э.}(C - I_Z C|M, F, S, \dots) + R_T(I_Z C|Z).$$

Роль управляющей переменной в целевой функции должны принять на себя инвестиции I_Z , т. е. доля материальных ресурсов общества, направляемых на создание и эксплуатацию технических систем безопасности.

Затраты на обеспечение безопасности следуют экономическому закону уменьшения отдачи. Этот закон для техногенного риска отображен на рис. 2.10, где показана эффективность затрат на снижение риска от эксплуатации АЭС (рассматривается французская АЭС мощностью 1300 МВт, срок службы 20 лет). Точки на кривой соответствуют различным системам безопасности на АЭС.

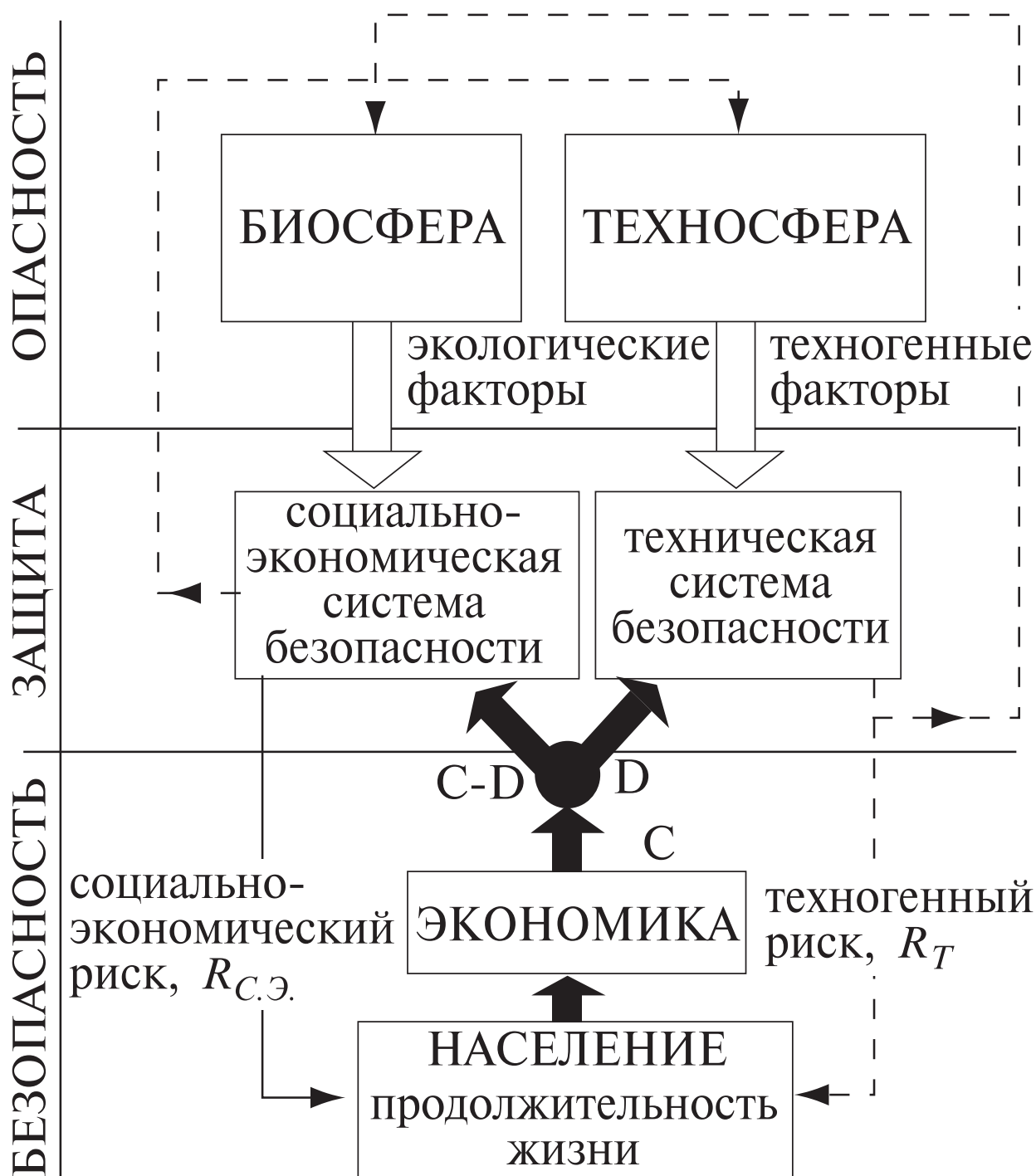


Рис. 2.9. Структурная блок-схема модели, описывающей процесс управления безопасностью (в качестве цели управления выступает состояние общественного здоровья, в качестве критерия — ожидаемая продолжительность предстоящей жизни человека)

Отношение $\Delta R_T / \Delta D$ (т. е. первая производная кривой на рис. 2.10) является мерой эффективности затрат на дальнейшее снижение техногенного риска R_T . В экономической теории отношения подобного рода относят к экономическим категориям и называют предельными затратами. В соответствии с этим данное отношение следует в дальнейшем называть предельной эффективностью затрат в технические системы безопасности

Число смертельных случаев от
рака и генетических повреждений
на 1300 МВт (эл.) в течение 20 лет (R_T)

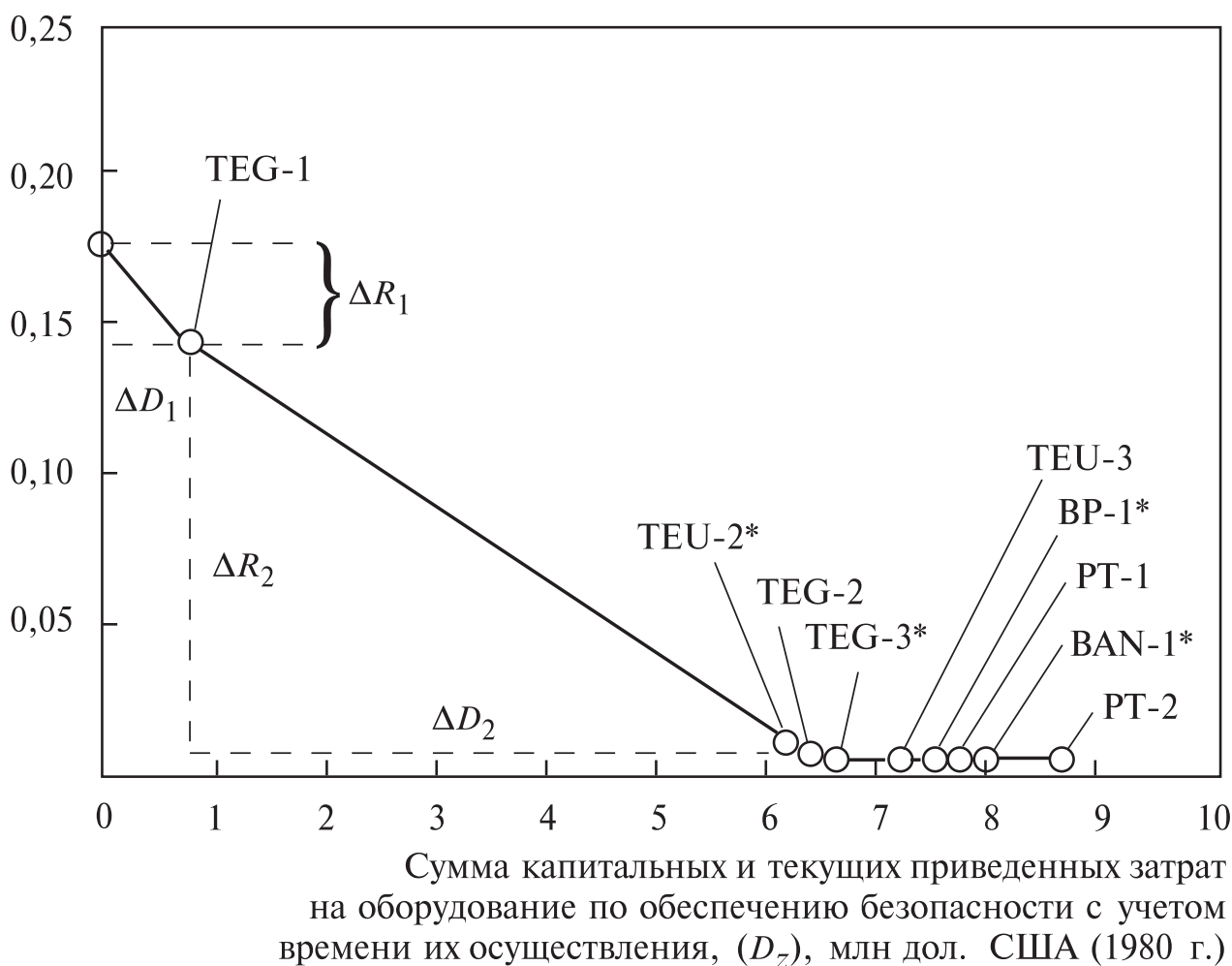


Рис. 2.10. Эффективность затрат на снижение техногенного риска

(т. е. на снижение риска R_T). Введем обозначение $\eta_T = \Delta R_T / \Delta D$. Из приведенного на рис. 2.10 графика следует, что предельная эффективность η_T на снижение риска R_T уменьшается с увеличением достигнутого уровня безопасности.

Конкретные значения предельной эффективности затрат h_m на снижение различных видов техногенного риска представлены в табл. 2.10 и на рис. 2.11. Эти данные характеризуют реальные затраты, направляемые на создание технических систем безопасности в различных отраслях человеческой деятельности.

Как свидетельствуют статистические данные, **затраты на снижение социально-экономического риска $R_{С.э.}$ также следуют экономическому закону уменьшения отдачи** (рис. 2.12). Этот пример иллюстрирует зависимость состояния здоровья от уровня дохода населения.

Теперь рассмотрим зависимость общего риска от затрат на создание и эксплуатацию технических систем безопасности (рис. 2.13). Увеличение

Таблица 2.10

Предельная эффективность затрат на снижение техногенного риска

Технические системы (или меры) снижения техногенного риска	Число спасенных жизней на 1 млн дол.
Контроль за качеством пищевых продуктов	30
Автомобильные ремни безопасности	7
Запрет на употребление сахара	3
Надувные автомобильные мешки безопасности	2
Улавливание серы на угольной ТЭС (труба высотой 120 м) до 50 %	0,4
Очистка автомобильных выхлопных газов: до 97 % от 97 до 99 %	0,1 0,02
Технические системы безопасности на АЭС: рекомбинаторы 6 дополнительных угольных слоев	0,1 0,05

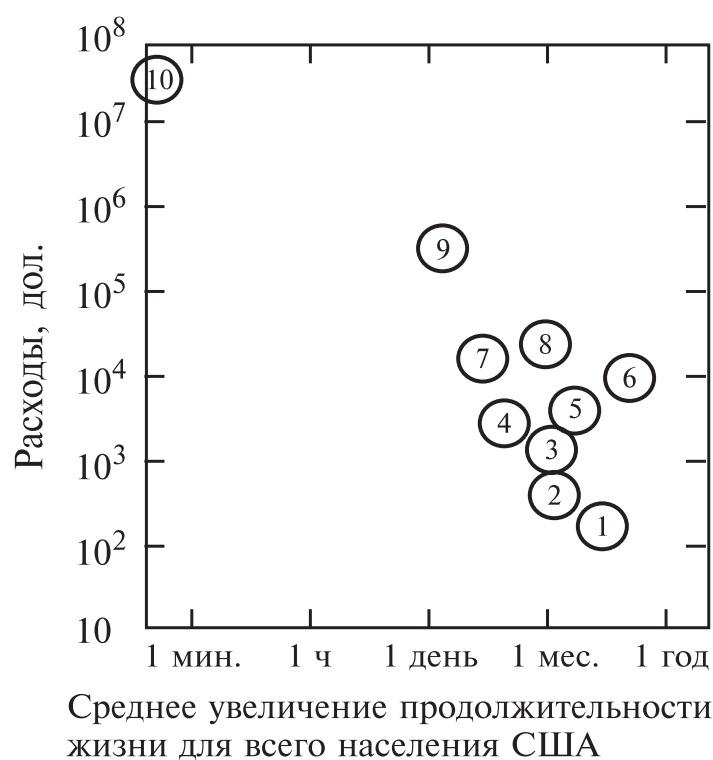


Рис. 2.11. Затраты (в дол.), направленные на продление

жизни одного человека (или X человеческих жизней на $1/X$ лет):

- 1 — мобильные реанимационные средства; 2 — раннее обнаружение рака легких;
 3 — лечение туберкулеза; 4 — пожарная (дымовая) сигнализация жилищ;
 5 — введение автомобильных ремней безопасности; 6 — сернистые очистительные средства;
 7 — реанимационные средства для автомагистралей; 8 — искусственная почка;
 9 — освещение перекрестков; 10 — контроль окиси углерода в отработавших газах автомобильных двигателей

Число преждевременных
смертей на 1 млн жителей

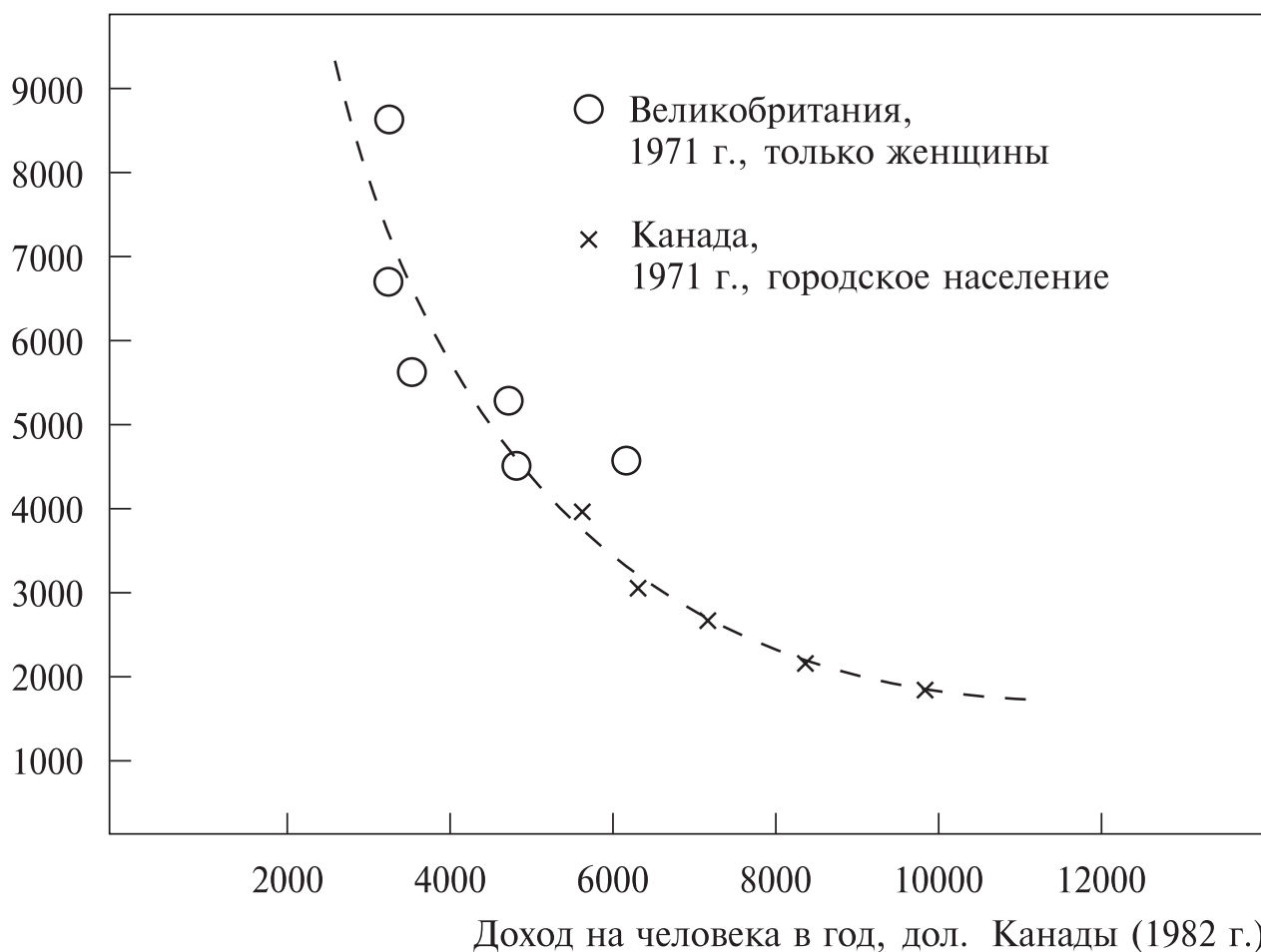


Рис. 2.12. Показатели смертности от уровня дохода

их ведет к уменьшению величины общего риска R_S из-за снижения техногенного риска R_T . Однако материальные ресурсы общества (C), независимо от того, велики они или малы, ограничены. Следовательно, затраты, направляемые на создание технических систем безопасности и, соответственно, снижение уровня загрязнения, отвлекают средства из сферы услуг и из тех областей, в которых производятся товары, повышающие материальный уровень жизни. Другими словами, **рост затрат на снижение техногенного риска ведет к повышению социально-экономического риска**. В результате, по мере увеличения затрат на технические системы безопасности и на продолжающееся снижение техногенного риска, темпы снижения общественного риска замедляются из-за возрастания социально-экономического риска.

При достижении некоторого значения $I_z = I_{z_{onm}}$ общий риск R_S проходит через минимум и далее начинается его рост. Он связан с чрезмерными затратами на создание технических систем безопасности и, вследствие этого, снижением затрат на создание социально-экономической системы безопасности.

Коэффициенты
смертности
в год (R_S)

Ожидаемая
продолжительность
предстоящей
жизни ($T_{L.E.}$), годы

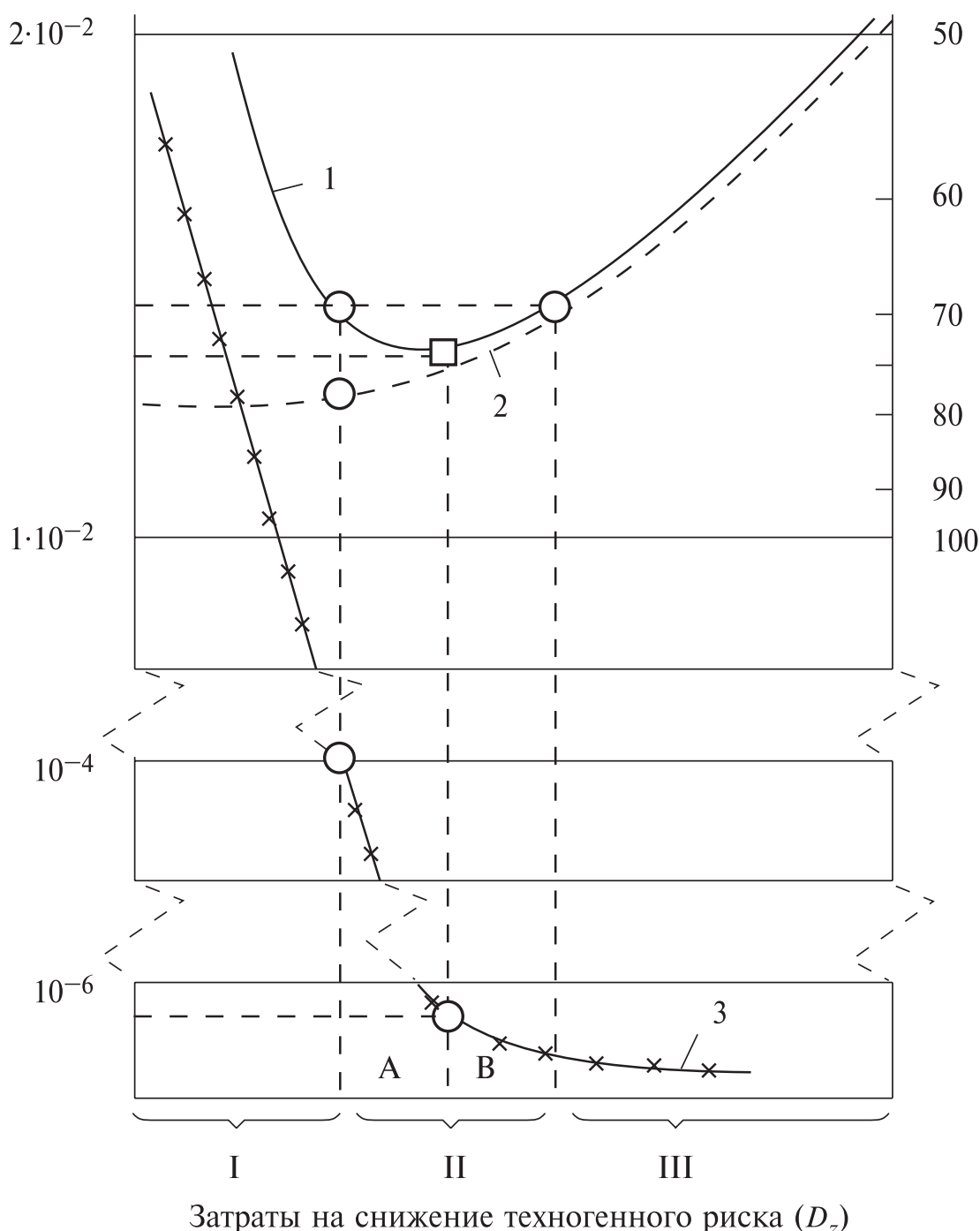


Рис. 2.13. Оптимизация затрат D_Z на снижение техногенного риска R_T :

1 — общий риск ($R_S = R_{C.Э.} + R_T$); 2 — социально-экономический риск ($R_{C.Э.}$);

3 — техногенный риск (R_T); $\square$ — точка минимума общего риска R_S ,

соответствующая равенству предельных затрат на снижение R_T и $R_{C.Э.}$;

I — область, в которой из-за недостаточности затрат на снижение R_T этот риск неприемлемо высок; II — область, в которой затраты на снижение R_T обеспечивают приемлемый уровень R_S ; III — область чрезмерных затрат на снижение R_T , ведущих к неприемлемо высокому уровню $R_{C.Э.}$.

Следовательно, *задача управления безопасностью сводится к определению такого значения I_z , при котором достигается минимум целевой функции R_S и, соответственно, максимум продолжительности предстоящей жизни $T_{L.E}$* . Таким образом, затраты на создание и эксплуатацию технических систем безопасности в задаче управления безопасностью играют роль управляющей переменной. Очевидно, что оптимальные значения, соответствующие минимуму целевой функции, зависят от уровня развития управляемой социально-экономической системы.

Из изложенных выше рассуждений следуют важные выводы:

1. Невозможно достичь «нулевого общего риска» или «абсолютной безопасности», которой часто требуют. Для любого данного уровня техногенного риска невозможно его дальнейшее снижение. Стремление снизить его до нуля ведет не к снижению, а к увеличению общего риска в обществе.

2. Приемлемый риск сочетает в себе технические, экономические, социальные и политические аспекты и представляет некоторый компромисс между уровнем безопасности и возможностями ее достижения.

3. Экономические возможности повышения безопасности технических систем не безграничны. Затрачивая чрезмерные средства на повышение безопасности, можно нанести ущерб социальной сфере, например, ухудшить медицинскую помощь, снизить расходы на образование, культуру. При увеличении затрат на безопасность технический риск снижается, но растет социальный.

4. Суммарный риск имеет минимум при определенном соотношении между инвестициями в техническую и социальную сферы. Эти обстоятельства нужно учитывать при выборе риска, с которым общество вынуждено мириться.

Подводя итог рассмотрения проблемы риска, подчеркнем, что угроза безопасности людей чаще всего состоит из многих составляющих риска, например, из основного существующего риска, риска вследствие ошибок и риска, на который идут сознательно при известных условиях.

Любой алгоритм оценки риска должен исходить из того, что твердо установлен экономический эквивалент угрозы. Этот эквивалент должен быть обоснован в том смысле, что он соответствует затратам, которые общество при данных условиях может себе позволить, чтобы предотвратить или уменьшить угрозу. Необходимо воспрепятствовать тому, чтобы, с одной стороны, ценой больших затрат был уменьшен и без того незначительный риск, а с другой — чтобы оставался большой риск, который можно было бы устранить с небольшими затратами. Установить такой эквивалент — еще не значит добиться успеха: эквивалент такого типа не удастся получить без влияния субъективных факторов. Тем не менее эти эквиваленты делают более ясным риск при принятии решения об его величине.

Этапы процедуры принятия приемлемого риска протекают по таким правилам: уменьшение, минимизация и оптимизация риска. Необходимо указать, что порядок перехода от одной группы решений к другой должен

строго следовать указанной последовательности. В заключение следует субъективно определить влияние не поддающихся учету факторов.

Решения, связанные с нормированием (установлением) риска, всегда остаются для инженера сомнительными, т. к. нельзя заранее определить затраты для четкого разделения во всех случаях оправданного и неоправданного риска. Проконтролировать, был ли оправдан данный риск, удастся всегда только после наступления нежелательного события, и возможно это только при оправданных убытках.

Поэтому инженерно-техническая деятельность, работа промышленных объектов в принципе не может быть полностью свободна от всякого риска, а на необходимый и оправданный риск нужно идти сознательно.

В таком выборе должны участвовать не только технические эксперты. Совместное рассмотрение проблемы представителями всех заинтересованных групп, открытое обсуждение достоинств и недостатков новых объектов, понятное неспециалисту обоснование оценок риска помогут выработать общее, согласованное решение. Только так можно достичь согласия в обществе и обеспечить безопасность его развития.

2.4. Моделирование риска

Анализ работы опасного производства показывает, что даже при нормальном функционировании влияние таких объектов на окружающую среду связано как с социально-психологическим воздействием на людей, так и с определенной потенциальной опасностью загрязнения атмосферы и прилегающей территории опасными веществами из-за недостаточно надежных технологий, недостаточной эффективности работы фильтровентиляционных устройств и вследствие других причин.

С другой стороны, как показывает отечественная и мировая практика, добиться полностью безаварийной работы предприятий, как химической промышленности, так и других отраслей, не представляется возможным.

Повышение промышленной безопасности предусматривает осуществление технических и организационных мер, включающих мониторинг опасного объекта, разработку планов ликвидации аварий и плана действий в чрезвычайных ситуациях на территории объекта и за его пределами. Нет сомнения, что любой технологический процесс должен ориентироваться на технологии, позволяющие максимально снизить вероятность аварий и уменьшить выход опасных веществ во внешнюю среду.

В то же время нельзя не учитывать, что рациональное размещение объектов также является одним из способов обеспечения безопасности людей и окружающей среды. Любой район, в пределах которого размещается объект, имеет ту или иную численность населения, хозяйственную ценность. Поэтому представляется целесообразным оценку различных вариантов размещения объектов проводить по комплексу показателей, характеризующих

состояние окружающей среды, особенности и потенциальную опасность объекта в случае аварийных ситуаций. Одним из таких показателей (критериев) является риск запроектных аварий.

Риск запроектной аварии при функционировании опасного объекта состоит в том, что в случае ее возникновения существует определенная вероятность поражения окружающего населения. Чем меньше прогнозируемые последствия запроектной аварии, тем более благоприятна данная площадка для размещения объекта.

Сценарий аварий на опасных объектах достаточно сложен. При авариях возможен выход отравляющих веществ (ОВ) в газообразном и аэрозольном состоянии с образованием облака зараженного воздуха и его движением по направлению ветра, заражением почв, растительности, водоемов и т. д.

Так как газообразное и аэрозольное состояние ОВ являются его боевым состоянием, то население, находящееся в зоне распространения облака или первичного заражения местности, может получить поражение различной степени тяжести.

Вероятность возникновения аварии определяется:

- особенностями технологического процесса;
- используемым оборудованием;
- степенью подготовленности персонала;
- временем, в течение которого функционирует данный технологический объект;
- интенсивностью технологических операций;
- техническими факторами (например, усталость металла);
- внешними неуправляемыми факторами (целенаправленная диверсия);
- человеческим фактором (ошибками эксплуатационного персонала).

Опасности, связанные с аварией, определяются:

- количеством освободившихся при аварии ОВ, их физико-химическими и токсическими свойствами. Например, в случае высвобождения фосфорорганических ОВ наибольшая опасность создается при образовании и распространении облака паров ОВ, в то время как при высвобождении люизита более опасно заражение подпочвенных вод мышьяксодержащими продуктами гидролиза люизита;
- архитектурно-планировочными особенностями застройки и транспортными коммуникациями;
- метеорологическими условиями и характеристиками окружающей среды: особенностями рельефа, характерной растительностью, структурой и свойствами почвы, условиями залегания подпочвенных вод, близостью рек и водозаборных сооружений, гидрографическими условиями;
- самым фактором наличия окружающего населения. Если такового в пределах зоны вероятного распространения ОВ в случае аварии не имеется, то потенциальная опасность близка в момент времени t нулю.

Для количественной оценки последствий аварии требуется создавать математическую модель, позволяющую осмыслить поведение технической системы, и с ее помощью оценить различные стратегии риска. Модель должна отражать важнейшие черты явления, т. е. в ней должны быть учтены все существенные факторы, от которых в наибольшей степени зависит функционирование системы. Вместе с тем она должна быть по возможности простой и понятной пользователю, целенаправленной, надежной (гарантия от абсурдных ответов), удобной в управлении и обращении, достаточно полной, адекватной, позволяющей легко переходить к другим модификациям и обновлению данных.

При построении математической модели может быть использован математический аппарат различной сложности — алгебраические и дифференциальные уравнения, как обыкновенные, так и с частными производными. В наиболее трудных случаях, если функционирование системы зависит от большого числа сложно сочетающихся между собой случайных факторов, может применяться метод статистического моделирования.

Выходными параметрами функционирования математической модели риска запроектной аварии определяется математическое ожидание количества пораженных жителей, постоянно проживающих в районе, подвергаемом опасности при функционировании объекта, если на объекте или его технологических элементах произойдет в случайный момент времени любая теоретически возможная запроектная авария, вызванная теми или иными причинами.

Рассмотрим возможные аналитические подходы к решению проблемы. Математическое ожидание (R) количества пораженных людей можно определить зависимостью:

$$R_{MO} = \int_{\sigma=0}^{2\pi} \int_{L=0}^{\infty} r(\sigma, L) P(\sigma, L) d\sigma dL, \quad (2.4.1)$$

где: $r(\sigma, L)$ — расстояние от объекта до точки нахождения человека в полярных координатах (начало координат совмещено с объектом);

$P(\sigma, L)$ — вероятность поражения человека в точке с координатами (σ, L) .

Вероятность поражения $P(\sigma, L)$ определяется следующим образом:

$$P(\sigma, L) = \alpha(\sigma) \cdot \beta(L, \sigma_0),$$

где: $\alpha(\sigma)$ — вероятность того, что в момент аварии будет реализовано направление ветра $\sigma = \sigma_0$;

$\beta(L, \sigma_0)$ — вероятность поражения на удалении L от места аварии в направлении σ_0 .

Поскольку авария равновероятна в любой момент времени (это допущение наиболее разумно), то $\alpha(\sigma)$ должна определяться на основе розы ветров в данной зоне или регионе.

Если пренебречь различиями в характеристиках подстилающей поверхности по каждому из направлений возможного распространения ОБ в случае аварии и ввести понятие средней (или средневзвешенной) характеристики, то можно существенно упростить задачу, разделив переменные:

$$R_{MO} = \int_{L=0}^{L=\infty} P(L) \int_{\sigma=0}^{\sigma=2\pi} r(\sigma, L) P(\sigma) d\sigma dL.$$

Изложенный подход к вычислению критерия риска запроектной аварии является одним из возможных вариантов аналитического метода его оценки.

В практике прогнозирования риска проф. М. А. Шахраманьяном с коллегами [75] предложены следующие подходы к математическому моделированию риска.

Моделирование индивидуального риска. В данном случае под индивидуальным риском понимают вероятность гибели человека в течение года от определенных причин (или их совокупности) в определенной точке пространства. Результаты анализа индивидуального риска отображаются на карте (ситуационном плане) предприятия (территории возможной природной ЧС) и прилегающих районов в виде замкнутых линий равных значений (см. рис. 2.4). Построение линий равного значения индивидуального риска (изолиний) R_I осуществляется по формуле:

$$R_I(x, y) = \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} P_{Q(x, y)} F(A_m), \quad (2.4.2)$$

где: $P_{Q(x, y)}$ — вероятность воздействия на человека в точке с координатами (x, y) Q -го поражающего фактора с интенсивностью, соответствующей гибели (поражению) человека (здорового мужчины 40 лет) при условии реализации A_m -го события (аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия);

$F(A_m)$ — частота возникновения A_m -го события в год;

M — множество индексов, которое соответствует рассматриваемым событиям (авариям, опасным природным явлениям, катастрофам, стихийным или иным бедствиям);

L — множество индексов, которые соответствуют перечню всех поражающих факторов, возникающих при рассматриваемых событиях.

Моделирование социального риска. Социальный риск R_C — зависимость частоты возникновения событий, вызывающих поражение определенного числа людей, от этого числа людей. Результаты анализа изображаются в виде графиков (так называемых $F-N$ диаграмм). Социальный риск $R-F(N)$ характеризует масштаб возможных чрезвычайных ситуаций. Социальный риск может быть рассчитан по формуле:

$$R_C(N) = \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} P(N|Q_m)P(Q_m|A_l)F(A_l), \quad (2.4.3)$$

где: $P(N|Q_m)$ — вероятность гибели (поражения) N людей от Q_m -го поражающего фактора;

$P(Q_m|A_l)$ — вероятность возникновения Q_m -го поражающего фактора при реализации A_l -го события (аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия).

Моделирование риска от аварий на пожароопасных и взрывоопасных объектах (ПВОО). После выявления на каждом из принятых к рассмотрению ПВОО всех видов аварий, специфики их возникновения и развития, расчета полей потенциальной опасности этих аварий и определения вероятности реализации их негативного потенциала (H_i), оценка индивидуального риска может проводиться по формуле:

$$R_e = \frac{\left(\sum_{x,y} R(x,y)N(x,y) \right)}{\left(\sum_{x,y} N(x,y) \right)}, \quad (2.4.4)$$

где: $N(x,y)$ — численность людей на площадке с координатами (x,y) ;

$R(x,y)$ — индивидуальный риск в точке с координатами (x,y) ,

$$R(x,y) = \sum_{ij} H_i E_{ij}(x,y) P_j, \quad (2.4.5)$$

где: H_i — вероятность выброса за год по сценарию i (в качестве сценариев аварии могут рассматриваться: нарушение герметичности замкнутых объемов за счет коррозии, нарушения за счет технологического режима и т.п.);

$E_{ij}(x,y)$ — вероятность реализации механизма воздействия j в точке (x,y) для сценария выброса i (в качестве сценариев механизма воздействия могут рассматриваться: тепловые поражения людей, поражения ударной волной, поражение обломками и т.п.);

P_j — вероятность летального исхода при реализации механизма воздействия.

Моделирование риска от аварий на химически опасных объектах. По известной токсодозе D в точке с координатами (x,y) математическое ожидание потерь среди населения $M(N)$ (средневзвешенная по вероятности величина потерь) определяется по формуле:

$$M(N) = \int \int_{S_r} P[D(x,y)] \psi(x,y) dx dy, \quad (2.4.6)$$

где: S_r — область интегрирования — площадь части города, в пределах которой возможно поражение людей при авариях на заданном объекте;
 $\psi(x, y)$ — плотность размещения людей в окрестностях точки с координатами (x, y) ;
 $P[D(x, y)]$ — вероятность поражения людей от величины токсодозы в точке города с координатами (x, y) определяемая из параметрического закона поражения людей сильнодействующими ядовитыми веществами;
 $D(x, y)$ — токсодоза, определяемая при переменной во времени концентрации химически опасного вещества для точки с координатами (x, y) по формуле:

$$D(x, y) = \int_{t_n}^{t_k} \Omega(x, y, t) dt, \quad (2.4.7)$$

где: $t_n \dots t_k$ — интервал времени;
 $\Omega(x, y, t)$ — концентрация химически опасного вещества в атмосфере для точки с координатами (x, y) в заданный момент времени t .

По формуле (2.4.6) математическое ожидание потерь определяется для случая, когда исходные данные известны. При заблаговременном определении математического ожидания потерь необходимо учитывать изменчивость направления (u) и скорости ветра (v) в течение года. Тогда потери могут быть определены по формуле:

$$M(N) = \int_{S_r} \int_0^{2\pi V_{\max}} \int_{V_{\min}} f(\theta, V) P[D(x, y)] \psi(x, y) dV d\theta dx dy, \quad (2.4.8)$$

где: $f(\theta, V)$ — функция плотности распределения направления θ и скорости V ветра;
 $V_{\min}$ и $V_{\max}$ — минимально и максимально возможные значения скорости ветра;
 S_r — область интегрирования.

Остальные обозначения те же, что и в формуле (2.4.6).

Учитывая выражение (2.4.8), оценка индивидуального риска на химически опасном объекте (ХОО) может проводиться по формуле:

$$R_e = \frac{H}{N} \int_{S_r} \int_0^{2\pi V_{\max}} \int_{V_{\min}} f(\theta, V) P[D(x, y)] \psi(x, y) dV d\theta dx dy, \quad (2.4.9)$$

где: H — вероятность аварии в течение года;
 N — численность населения.

Моделирование риска от аварий на радиационно опасных объектах.

Индивидуальный риск поражения людей в городе при аварии на рядом рас-

положенном радиационноопасном объекте (РОО) может быть определен по формуле:

$$R_e = \frac{H}{N} \int_{S_r} \int_0^{2\pi} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f(\theta, V) P[D(x, y)] \psi(x, y) dV d\theta dx dy, \quad (2.4.10)$$

где: $P[D(x, y)]$ — вероятность поражения людей от величины дозы радиоактивного заражения в точке с координатами (x, y) определяется из закона поражения людей;

$D(x, y)$ — доза радиоактивного заражения при переменном во времени уровне радиации для точки с координатами (x, y) определяется по отдельным методикам;

$\psi(x, y)$ — плотность размещения незащищенного населения в пределах элементарной площадки города с координатами (x, y) .

Комплексная оценка техногенного риска может быть реализована также по следующей математической модели.

Для оценки риска запроектной аварии, наряду с аналитическими методами, представляется возможным использование метода Монте-Карло — метода статистического моделирования. Идея этого метода чрезвычайно проста и состоит в следующем. Вместо того чтобы описывать случайный процесс с помощью аналитического аппарата, производится «розыгрыш» случайного явления с помощью последовательных операций, дающих случайный результат. Конкретное осуществление случайного процесса складывается каждый раз по-иному, поэтому в результате статистического моделирования (розыгрыша) возникает каждый раз новая, отличная от других, искусственная реализация этого процесса. При числе повторений ($N \geq 100$) метод дает статистически устойчивое сходство результата. При этом на основании перечисленных исходных данных формируется массив случайных значений величин.

Обобщенный алгоритм оценки риска методом статистического моделирования может состоять из следующих последовательных процедур:

Шаг 1. На основе равновероятного датчика случайных чисел разыгрывается время, число и месяц возникновения аварии.

Шаг 2. Исходя из реализованных временных характеристик аварий и с учетом вероятности распределения метеоусловий за большой период времени для данной местности прогнозируют конкретный вектор значений метеоусловий, включающий температуру воздуха и почвы, стратификацию атмосферы, скорость и направление ветра (при разработке статистической модели аварии не представляет труда учесть фактическую розу ветров для любой точки со случайным розыгрышем месяца, дня, времени аварии, конкретного направления и скорости ветра).

Шаг 3. На основе сформулированного перечня аварий и с учетом равновероятной природы их возникновения разыгрывается конкретный тип ава-

рии, происшедшей на объекте, и ее исходные данные (количество освобожденного ОБ, площадь разлива, максимальная концентрация в зоне аварии и т. д.) с учетом конкретных метеоданных.

Шаг 4. На основе, например, гауссовской модели распределения примеси и исходных данных, реализованных по пп. 1, 2, 3, рассчитывается величина приведенной зоны поражения той или иной степени тяжести и ее положение (конфигурация, директриса следа облака и т. д.) на конкретной местности.

Шаг 5. На основе известного математического ожидания распределения населения вокруг объекта моделируется конкретное распределение населения в момент аварии; вычисляют общее количество человек, попавших в приведенную зону поражения той или иной степени тяжести.

Полученное таким образом значение оценки риска, характеризующееся количеством людей, пораженных в результате аварии той или иной степени тяжести, является единичным значением, т. е. единичной реализацией. Для получения статистически достоверных результатов необходимо получить как можно большее количество реализаций N (естественно в разумных пределах, например $N = 1000$) путем «прогона» на ЭВМ математической модели, разработанной согласно вышеописанному алгоритму, N раз. В дальнейшем по N реализациям проводят оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения числа пораженных той или иной степени тяжести на данном объекте при запроектной аварии.

Аналогичный подход может быть применен и для оценки потенциальной опасности перевозок опасных грузов. При этом необходимо дополнительно ввести учет распределения населения на маршрутах перевозок, смоделировать время начала и окончания перевозок, конкретное время следования по маршруту.

2.5. Принципы построения информационных технологий управления риском

Имеющийся опыт анализа и управления риском показывает, что разработка и совершенствование процедур и методов в этой сфере осуществляется по пути приближения к принципам системного подхода. Действительно, управление риском — процесс требующий рассмотрения широкого круга вопросов. К таким относятся — технические, информационные, социально-экономические, экологические, политические. По существу речь идет о новом виде технологии — «Технологии управления риском» (ТУР). В рамках концептуального подхода предлагается структурная модель ТУР, которая в методическом плане наглядно демонстрирует принцип объединения теоретических разработок и практического опыта в области управления техническим риском, экологическим риском и риском в социально-экономических системах.

Механизм ТУР должен базироваться на блочной структуре в виде системных процедур. Такое строение отражает разделение и кооперацию деятельности в рассматриваемой сфере, которые обеспечивают возможность независимого предоставления услуг, развитие системы специализированных государственных или отраслевых коммерческих организаций.

Первый блок — информационно-аналитический. Обеспечивает сбор, первичную обработку и анализ информации, ее хранение. Представляет собой соответствующим образом организованный компьютерный банк данных и библиотеку документов, содержащих необходимые для ТУР первичные сведения о проблеме.

Второй блок — блок исследований. Он обеспечивает непрерывную поддержку ТУР посредством разработки необходимых версий пакетов прикладных программ (ППП), методик, норм и правил, соответствующих особенностям рассматриваемых объектов, технологии и параметрам окружающей среды.

Третий блок — включает аналитическую экспертизу и прогнозные исследования. Используя продукт предыдущего блока и методы проведения экспертизы, выполняется «рисковый мониторинг», осуществляется прогноз развития риска и последствий, оценивается ущерб по риску, формализуются предпочтения, вырабатываются рекомендации по стратегии и тактике действий, средствам защиты.

Четвертый блок — управления. Построение базового сценария управления риском завершает этап аналитической экспертизы и прогнозных исследований. Группа управления должна:

- выработать единый взгляд на цели, задачи и объект прогнозирования и управления;
- достигнуть единого мнения о механизме развития риска и методах управления им;
- сформулировать текущие и перспективные планы;
- проверить и отладить взаимодействия между службами защиты.

После того как получены сценарии развития риска, выполнена его оценка, приняты решения по стратегии и тактике действий, разработанные приоритеты действий спускаются «вниз» по уровням управления.

Входные и выходные потоки этих блоков могут быть построены в виде ветвящихся структур исходя из рассматриваемой проблемы (задачи) поиска рекомендаций — по глубине и (или) ширине. Границы устанавливаются из условий возможного оптимального разрешения той или иной задачи (подзадачи) и (или) имеющихся ограничений на информационные данные и материальные ресурсы.

Организационные принципы. Возникающие на уровне регионов и отраслей проблемы безопасности многообразны и отличительны, им свойственны такие характеристики, как:

- своеобразие и уникальность, так как условия (внешние и внутренние) развития риска, как правило, не повторяются;

- большое количество параметров и высокая сложность разрешаемых проблем;
- большая начальная неопределенность вновь возникающих проблем;
- множество противоречивых критериев выбора подходящей альтернативы;
- сложность предвидения последствий реализованных решений;
- сложность поиска компромисса между социальной средой и ведомственными интересами лиц, принимающих стратегические решения;
- дефицит времени, отведенного для принятия решения.

Ввиду этого в основу создания ТУР можно положить **два организационных признака — территориальный и отраслевой**, что облегчит требования к информационно-аналитическому обеспечению и упростит последующие процедуры ТУР. При отработке ТУР по признакам возможен дальнейший переход в единую систему.

Номенклатура предлагаемого продукта и услуг определена содержанием каждого блока. Обслуживание клиентов (заказчик, потребитель) может осуществляться по схемам: сетевая компьютерная связь клиента с фирмой — консультантом; компьютерная база клиента и обновляемые экспертные системы и версии ППП; выездная экспертно-аналитическая группа; непосредственное обслуживание в фирме; почтовая связь — рассылка методик, норм, правил и т. д.

Мотивация потребления такого рода услуг обусловлена Федеральным Законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», Законом РФ об охране окружающей природной среды и др. законодательными актами.

Необходимость (желание) воспользоваться продуктами и услугами ТУР могут возникнуть при:

- лицензировании деятельности (проектирование, строительство, эксплуатация);
- анализе технологических, экономических рисков перед принятием инвестиционных вложений в действующее предприятие;
- попытках привлечения кредитов и инвестиций в проекты;
- приобретении контрольного пакета акций предприятия, использующего опасные или старые технологии;
- профилактической диагностике технических систем, технологий, продукции;
- страховой деятельности;
- разрешении конфликтов в случае возникновения опасной ситуации на промышленном объекте;
- трастовом управлении предприятием и т. д.

Г Л А В А 3

Роль внешних факторов, воздействующих на формирование отказов технических систем

3.1. Общие замечания

В зависимости от условий эксплуатации изменяются показатели надежности и безотказности системы.

Отказы технических устройств по их физической природе — следствие физико-химических процессов, непосредственно или косвенно влияющих на работоспособность элементов и возникновение отказов; определяются: типом материала; местом протекания процесса; видом энергии, определяющей характер процесса; эксплуатационным воздействием; внутренним механизмом процесса.

С позиций энергоэнтропийной концепции опасности следует выделить три источника воздействия:

- действие энергии окружающей среды, включая человека, выполняющего функции оператора или технического персонала;
- внутренние источники энергии, связанные как с рабочими процессами, протекающими в системе, так и с работой отдельных частей системы;
- потенциальная энергия, которая накоплена в материалах и элементах системы в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливке, монтажные напряжения).

Различные виды энергии вызывают в элементах системы процессы, связанные со сложными физико-химическими явлениями, приводящими к деформации, износу, поломке, коррозии и другим видам повреждений. Возникновение повреждений влечет за собой изменение выходных параметров системы и отказ.

Процессы, приводящие к изменению начальных свойств, протекают в материалах, из которых изготовлены элементы, а также в смазочных материалах, топливе, которые также участвуют в рабочем процессе.

Механические свойства материалов (прочность, относительное удлинение и т. д.), электрические (электрическая проводимость, напряженность электрического поля пробоя, электрическая прочность, коэффициент электрических потерь, диэлектрическая проницаемость, остаточная поляризация, удельное сопротивление и др.) и магнитные свойства материалов (магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, остаточная магнитная индукция и др.) существенно зависят от температуры, механических напряжений, влажности, напряженности электрического поля, газовой среды, рассеиваемой мощности, длительности работы и других воздействующих факторов.

Для многих элементов накопление энергии внешних воздействующих факторов является монотонным. Используя связь между нагрузкой и плотностью потока энергии воздействующего фактора, зная время воздействия, можно получить вероятность безотказной работы за это время при данном воздействующем факторе (обычно выбирают превалирующий фактор), а также определить значения интенсивности отказов элементов. Полученная оценка вероятности, в отличие от обычно применяемых, позволяет учесть эффект превалирующих воздействующих факторов с помощью энергетической характеристики воздействия, определяющей количество «вненесенной» энергии воздействия, а также допустимые пределы изменения и статистические характеристики элемента, определяющие его способность противостоять воздействующим факторам.

При наличии зависимостей, отражающих влияние условий эксплуатации и нагрузки на надежность элемента, их следует применять в методах расчета, известных в теории надежности.

Отказы в технических системах и развитие аварии могут происходить и по причине внешних воздействий, не связанных с производственными процессами. Сюда относятся внешние воздействия, связанные с:

- автомобильным и железнодорожным транспортом (особенно при перевозке опасных грузов);
- работой станций по заправке горючим;
- работой соседних предприятий, в особенности тех, которые используют легковоспламеняющиеся или взрывоопасные вещества;
- механическими ударами, как, например, при обрушении конструкций.

Такие ситуации зачастую избежать невозможно, их вероятность следует учитывать при планировании размещения предприятия на местности, а также при создании легко повреждаемых элементов установок.

Внешние воздействия могут быть связаны с действием сил природы. Наиболее важными из них являются: ветер, наводнения, землетрясения, оседание почвы в результате горных работ или эксплуатации тепловых коммуникаций, очень сильный мороз или очень сильная жара, удар молнии.

Если известно, что в местах расположения предприятия вероятны такие природные воздействия, следует принимать определенные профилактические меры.

На любом опасном производстве могут иметь место акты саботажа работающего персонала или диверсии. Защита систем в этом случае осложнена и никогда не может быть идеальной. Однако такие возможности следует учитывать при проектировании производств.

Умение персонала обеспечивать нормальную работу представляется очень важным не только для предприятий, использующих малоавтоматизированные технологические процессы, но и для высокоавтоматизированных и механизированных предприятий, требующих вмешательства человека только в аварийных обстоятельствах.

Однако ошибки, совершаемые персоналом, так же разнообразны, как и конкретные производственные функции. Наиболее часто встречаются следующие ошибки:

- ошибки обнаружения;
- ошибки в оценке ситуации и принятии решения;
- ошибки выполнения действия (последовательности, пропуск, включение лишнего, нарушение правил);
- ошибки в ориентации (недостаток информации, избыток информации);
- ошибки связи.

Также разнообразны и причины, приводящие к ошибочным действиям человека. Ошибки происходят вследствие того, что работающий персонал не имеет информации об опасностях, не обладает достаточной квалификацией для выполнения данного вида работ, безопасный труд не поощряется руководством, человек может находиться в состоянии психического расстройства, болезни или переутомления, не соблюдаются эргономические принципы обеспечения безопасности на производстве и т. д.

3.2. Классификация внешних воздействующих факторов

Для обеспечения надежной работы сложных систем необходимо обеспечить надежную работу входящих в нее простых элементов; это зависит от умения оценивать ожидаемое воздействие внешней среды.

В зависимости от характера воздействий на изделия внешние воздействующие факторы (ВВФ) делят на семь классов: механические, кинематические и другие природные ВВФ, биологические, радиационные, ВВФ электромагнитных полей, ВВФ специальных сред, термические. Каждый класс в зависимости от физической, биологической или химической сущности явлений, лежащих в основе ВВФ, делят на группы, а каждую группу — на виды, с соответствующими характеристиками.

Для элементов технических систем, расположенных на земной поверхности, определяющими и дестабилизирующими внешними факторами являются климатические. Класс климатических факторов подразделяют на группы и виды факторов (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Класс климатических и других природных ВВФ

Номенклатура ВВФ		Характеристика ВВФ
Группа	Вид	Наименование и единицы измерения
Атмосферное давление	Атмосферное повышенное давление	Повышенное рабочее давление, Па Продолжительность действия повышенного рабочего давления, ч, сут. Повышенное предельное давление, Па
	Атмосферное пониженное давление	Пониженное рабочее давление, Па Пониженное предельное давление, Па Продолжительность действия пониженного давления, ч, сут.
	Изменение атмосферного давления	Скорость изменения давления, Па/м ² Диапазон изменения давления, Па Число циклов изменения давления за данное время
Температура среды	Повышенная температура среды	Повышенная рабочая температура, °С Повышенная предельная температура, °С Продолжительность воздействия температуры, ч, сут.
	Пониженная температура среды	Пониженная рабочая температура, °С Пониженная предельная температура, °С Продолжительность воздействия температуры, ч, сут.
	Изменение температуры среды	Скорость изменения температуры, °С/с Диапазон изменения температуры, °С Число циклов изменения температуры за данное время
Влажность воздуха или других газов	Повышенная влажность	Относительная влажность при данной температуре, %
	Пониженная влажность	Абсолютная влажность, г/м ³ Точка росы, °С Число циклов изменения повышенной (пониженной) влажности за данное время Продолжительность воздействия повышенной (пониженной) влажности, ч, сут.

Номенклатура ВВФ		Характеристика ВВФ
Группа	Вид	Наименование и единицы измерения
Атмосферные осадки	Атмосферные выпадаемые осадки (дождь, снег, снежная крупа, морозь)	Интенсивность осадков, мм/ч Угол падения осадков, градусы Продолжительность воздействия выпадаемых осадков, ч, сут. Толщина отложения осадков, мм
	Атмосферные конденсированные осадки (роса, иней, изморозь, гололед)	Плотность осадков, кг/м ³ Скорость обледенения, мм/с Число циклов обледенения Продолжительность воздействия конденсированных осадков, ч, сут.
	Соляной (морской) туман	Водность тумана, мкм Средний размер капель, мкм Продолжительность воздействия соляного тумана, ч, сут.
Пыль, песок	Статическая пыль (песок)	Массовая концентрация пыли (песка), г/м ³
	Динамическая пыль (песок)	Массовая доля пылевой смеси, % Размер частиц пыли, мкм Продолжительность осаждения (воздействия) пыли (песка), ч, сут. Массовая доля пылевой смеси, % Массовая концентрация пыли, г/м ³ Скорость циркуляции частиц, м/с Размер частиц пыли, мкм
Солнечное излучение	Интегральное излучение	Длина волны интегрального излучения, мкм
	Ультрафиолетовое излучение	Плотность потока интегрального излучения, Вт/м ² Продолжительность воздействия интегрального излучения, ч, сут. То же Эффективная суммарная солнечная ультрафиолетовая радиация, Дж/(м ² · год)
Поток воздуха и других газов	Ветер	Среднее значение скорости ветра, м/с Максимальное значение скорости ветра, м/с Скоростной напор ветра, Па Продолжительность воздействия ветра, ч, сут.

Номенклатура ВВФ		Характеристика ВВФ
Группа	Вид	Наименование и единицы измерения
Среда с коррозионно-активными агентами	Атмосфера с коррозионно-активными агентами	Массовая концентрация хлоридов и газов (сернистого, азота, аммиака, озона) в воздухе, мг/м ³ Продолжительность воздействия атмосферы с коррозионно-активными агентами, сут.
	Водная среда с коррозионно-активными агентами	Солёность морской воды (льда), % Хлорность воды, % Массовая концентрация сероводорода, кислорода, катионов кальция и др., ммоль/л
	Почва с коррозионно-активными агентами	Агрегатный состав почвы, % Массовая доля хлора, карбонатов и др., %
Ледово-грунтовая среда	Лёд	Толщина льда, м Продолжительность воздействия, ч, сут.
	Снежный покров	Толщина снежного покрова, см, м Продолжительность воздействия, ч, сут.

Для конкретных типов или групп технических изделий виды воздействующих климатических факторов и их значение устанавливают в зависимости от макроклиматических районов, в которых будут эксплуатироваться системы.

Формирование климата обусловливается воздействием режима солнечной радиации, циркуляции атмосферного воздуха, влагооборота, физико-географических особенностей, воздействием человека, а также географическим положением территории. Основные характеристики климатических районов даны в табл. 3.2.

Воздействие климатических факторов вызывает определенного вида отказы, интенсифицирует потоки отказов, возникающих в результате случайных перегрузок, несовершенства структурной схемы машины и др.

На машины, механизмы и аппараты технических систем при эксплуатации на открытом воздухе действуют климатические факторы и атмосферные явления, которые вызывают изменение физических и химических свойств конструкционных и эксплуатационных материалов.

Ухудшение эксплуатационных свойств материалов и условий работы механизмов машин вызывает пусковые и нагрузочные отказы и ускоряет появление внезапных и постепенных отказов.

Поскольку под действием климатических факторов снижается надежность элементов систем (прежде всего изменяются свойства конструкцион-

Таблица 3.2

Основные характеристики климатических районов

Климатический район	Средняя месячная температура воздуха, °С		I*	II**
	январь	июль		
Очень холодный	−50...−30	+2...+18	—	10...100
Холодный	−30...−15	+2...+25	—	1...10
Арктический приполюсный	−33...−28	−1...0	> 90	0...2
Арктический восточный	−28...−18	0...+8	> 80	0...0,1
Арктический западный	−30...−2	−1...+12	> 80	0...3
Умеренно холодный	−30...−15	+6...+25	—	0...0,1
Умеренный	−15...−8	+8...+25	< 80	—
Умеренно влажный	−15...−10	+10...+20	≥ 80	—
Умеренно тёплый	−8...−4	+16...+25	< 70	—
Умеренно тёплый влажный	−8...−4	+16...+25	≥ 70	—
Умеренно тёплый с мягкой зимой	−4...0	+16...+25	< 70	—
Тёплый влажный	0...+4	+20...+25	> 70	—
Жаркий сухой	−15...+4	+25...+30	< 40	—
Очень жаркий сухой	−4...+4	≥ 30	< 20	—

* Средняя месячная относительная влажность воздуха в июле в 13 ч, %.

** Число дней в году с минимальной температурой воздуха ниже минус 45 °С.

ных и эксплуатационных материалов), следует рассмотреть влияние климатических факторов на эти материалы.

3.3. Воздействие температуры

Влияние низких и высоких температур на свойства материалов в большинстве случаев носит диаметрально противоположный характер. Кроме того, быстрое изменение этих температур (в течение суток или нескольких часов) увеличивает эффект вредного их воздействия на машины.

Тепловые воздействия возникают как снаружи системы — солнечная радиация, тепло от близко расположенных источников, так и внутри системы — выделение тепла электронными схемами, при трении механических узлов, химической реакции и др. Особенно вреден нагрев узлов при повышенной влажности окружающей среды, а также при циклическом изменении этих факторов.

Различают три вида тепловых воздействий:

Непрерывное. Рассматривают при анализе надежности систем, работающих в стационарных условиях.

Периодическое. Рассматривают при анализе надежности систем при повторно-кратковременном включении аппаратуры и изделий под нагрузку и при резких колебаниях условий эксплуатации, а также при суточном изменении внешней температуры.

Апериодическое. Оценивают при работе изделий в условиях теплового удара, следствием чего являются внезапные отказы.

Повреждение изделий, вызванное стационарным тепловым воздействием, обусловлено в основном превышением при эксплуатации предельно допустимого значения температуры.

Деформации изделий, возникающие при периодических тепловых воздействиях, приводят к возникновению повреждений. На некоторые изделия одновременно с периодическим нагревом и охлаждением действуют и резкие изменения давления, что и приводит к повреждениям.

Высокая скорость изменения температуры (тепловой удар), имеющие место при аperiодических воздействиях тепла, приводит к быстрому изменению размеров материалов, что является причиной повреждений. Этот факт чаще проявляется при недостаточном учете коэффициентов линейного расширения сопрягаемых материалов. В частности, при повышенных температурах заливочные материалы размягчаются, происходит расширение сопрягаемых с ними материалов, а при переходе к отрицательным температурам происходит сжатие заливочных материалов и растрескивание их в местах соприкосновения с металлами. При отрицательных температурах возможна значительная усадка заливочных материалов, следовательно, у электроизделий повышается возможность электрического перекрытия. Низкие температуры непосредственно ухудшают основные физико-механические свойства конструкционных материалов, повышают возможность хрупкого разрушения металлов. Низкие температуры существенно влияют на свойства полимерных материалов, вызывая процесс их стеклования, высокие же температуры изменяют упругость этих материалов. Нагрев полимерных изоляционных материалов резко снижает их электрическую прочность и сроки службы.

При оценке показателей надежности технических изделий, входящих в системы, необходимы данные об изменениях температуры окружающего воздуха во времени.

Характер изменения температуры во времени описывается случайным процессом:

$$T(t) = \bar{T}(t) + \psi(t),$$

где: $\bar{T}$ — средняя температура, соответствующая времени t , °С;

t — время от 0 ч 1 января до 24 ч 31 декабря;

ψ — случайная составляющая температуры, соответствующая времени t , °С.

Среднее значение $\bar{T}$ рассчитывают по формуле:

$$\bar{T}(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t,$$

где: A_0 — коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой температуры, °C;

A_i, B_i — амплитуды колебаний математического ожидания температуры, соответствующие частоте ω_i .

При резком изменении температуры воздуха происходит неравномерное охлаждение или нагрев материала, что вызывает дополнительные напряжения в нем. Наибольшие напряжения возникают при резком охлаждении деталей. Относительное удлинение или сжатие отдельных слоев материала определяется зависимостью:

$$\varepsilon_t = \alpha_t (t_2 - t_1),$$

где: α_t — коэффициент линейного расширения;

t_1 — температура в первом слое;

t_2 — температура во втором слое; $t_2 = t_1 + (\partial t / \partial l) \Delta l$;

Δl — расстояние между слоями.

Дополнительные (температурные) напряжения в материале

$$\sigma_t = \varepsilon_t E,$$

где: E — модуль упругости материала.

Зависимость удельной электропроводности материала от его температуры определяется уравнением

$$\sigma_{\vartheta} = \sigma_{\vartheta 0} e^{\alpha t} \approx \sigma_{\vartheta 0} [1 - \alpha t],$$

где: $\sigma_{\vartheta 0}$ — удельная электропроводность при $t = 0$ °C,

α — температурный коэффициент.

Скорость процессов механического разрушения нагруженного твердого тела и, соответственно, время до разрушения зависят от структуры и свойств тела, от напряжения, вызываемого нагрузкой, и температуры.

Предложен ряд эмпирических формул, описывающих зависимость времени до разрыва τ (или скорости разрушения v_{ε}) от этих факторов. Наибольшее признание получила установленная экспериментально для многих материалов (чистых металлов, сплавов, полимерных материалов, полупроводников органического и неорганического стекла и др.) следующая температурно-временная зависимость прочности — между напряжением σ , температурой T и временем τ от момента приложения постоянной механической нагрузки до разрушения образца:

$$\tau = \tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \right),$$

где: τ_0, U_0, γ — параметры уравнения, характеризующего прочностные свойства материалов.

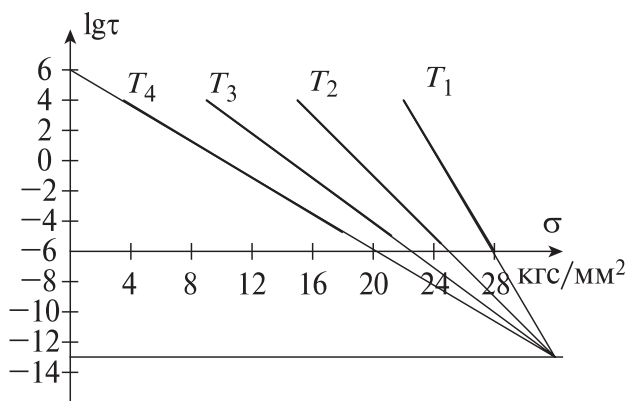


Рис. 3.1. Типичная зависимость долговечности материала от напряжения при различных температурах ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$)

Графики зависимости $\lg \tau$ от σ для различных T представляют собой семейства прямых линий, сходящихся при экстраполяции в одной точке при $\lg \tau = \lg \tau_0$ (рис. 3.1).

Для скорости процесса разрушения, следовательно, можно написать:

$$v_\varepsilon \approx \tau^{-1} = \tau_0^{-1} \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right).$$

Все изменения прочностных свойств материалов, проходящие при изменении их чистоты, при тепловой обработке и деформации, связаны с изменением только величины γ . Значения γ может быть вычислено из временной зависимости, полученной при одной температуре:

$$\gamma = \alpha RT,$$

где: α — тангенс угла наклона прямой $\lg \tau = f(\sigma)$.

Как говорилось выше, низкие температуры изменяют физико-механические свойства конструкционных и эксплуатационных материалов. Результатами воздействия низких температур являются:

- увеличение вязкости дизельного топлива;
- снижение смазывающих свойств масел и густых смазок;
- застывание механических жидкостей, масел и смазок;
- замерзание конденсата и охлаждающих жидкостей;
- снижение ударной вязкости нехладостойких сталей;
- отвердевание и охрупчивание резин;
- уменьшение сопротивления электропроводников;
- обледенение и покрытие инеем элементов машин.

Последствиями этих факторов являются:

- ухудшение условий работы узлов трения и устройств машины;
- снижение несущей способности элементов;
- ухудшение эксплуатационных свойств материалов;
- воздействие дополнительных нагрузок;
- пробой изоляции обмоток электрических машин систем.

Перечисленные влияния низких температур на свойства материалов вызывают увеличение параметров пусковых, нагрузочных и рабочих отказов, а также снижение сроков службы элементов машин.

3.4. Воздействие солнечной радиации

На открытом воздухе поверхности изделий подвергаются действию прямых солнечных лучей. В материалах, используемых в конструкциях систем, под действием солнечной радиации возникают сложные процессы, вызывающие старение этих материалов. Кроме того, солнечная радиация является основным фактором формирования теплового режима атмосферы и поверхности земли. Поэтому влияние на свойства материалов высоких и низких температур воздуха определяется, в конечном счете, влиянием солнечной радиации на тепловой режим воздуха.

Приход солнечной радиации определяется, прежде всего, астрономическими факторами: продолжительностью дня и высотой солнца. Солнечная радиация, поступающая на земную поверхность, является одним из основных климатических факторов. В свою очередь, она в значительной степени зависит от циркуляции атмосферы и особенностей подстилающей поверхности.

Воздействие солнечной радиации на технические изделия определяется диапазоном электромагнитных волн, достигающих их поверхности.

Спектр излучаемой Солнцем энергии состоит из нескольких частей. На волны ультрафиолетовой части спектра ($\lambda < 3900 \cdot 10^{-10}$ м) приходится около 9 % энергии солнечного излучения, на волны видимой части спектра ($\lambda = 3900 \cdot 10^{-10} \dots 7600 \cdot 10^{-10}$ м) — около 41 % и на инфракрасные волны ($\lambda = 7600 \cdot 10^{-10} \dots 1000000 \cdot 10^{-10}$ м) — около 50 %.

Атмосфера, окружающая Землю, поглощает около 19 % солнечной энергии (водяным паром, озоном, углекислым газом, пылью и другими составляющими атмосферы). Около 35 % энергии поглощается в космическом пространстве. Земной поверхности достигает только 45 % солнечной энергии, но наличие облаков уменьшает количество солнечной энергии, достигающей Земли, примерно на 75 % по сравнению с ясными днями.

Поверхностная плотность теплового потока суммарной радиации зависит от состояния облачности. Зависимо от высоты солнца (6—44,9°) в летние месяцы поток суммарной радиации изменяется в безоблачную погоду от $11,2 \cdot 10^{-3}$ до $78,4 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², при наличии солнца и облаков — в $9,8 \cdot 10^{-3}$ до $80,5 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², при сплошной облачности — от $4,2 \cdot 10^{-3}$ до $25,9 \cdot 10^{-3}$ Вт/см².

Поток суммарной радиации также зависит и от самих облаков, если солнце просвечивает через перистые облака, то поток суммарной радиации будет изменяться от $4,9 \cdot 10^{-3}$ до $64,4 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², если же облака слоистые — от $3,5 \cdot 10^{-3}$ до $38,5 \cdot 10^{-3}$ Вт/см². Влияние на величину суммарной радиации оказывает также высота облаков, если облака высокие, поток изменяется от $5,6 \cdot 10^{-3}$ до $49,7 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², если низкие — от $6,3 \cdot 10^{-3}$ до $27,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/см².

Интегральная плотность теплового потока солнечной радиации зависит от высоты. До 15 км интегральная плотность теплового потока составляет 1125 Вт/м^2 , в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра ($\lambda = 280\text{—}400 \text{ мкм}$) — 42 Вт/м^2 , свыше 15 км — 1380 Вт/м^2 , плотность потока ультрафиолетовой части спектра — $10,0 \text{ Вт/м}^2$.

Изменение плотности теплового потока солнечной радиации оценивается отношением ее максимального значения к минимальному, выраженному в %. Наименьшие суточные изменения наблюдаются в пустынных районах, для которых характерна безоблачность.

Наличие паров воды и пыли в воздухе существенно уменьшает плотность теплового потока солнечной радиации. Наиболее сильное действие на материалы и изделия оказывают солнечные лучи, перпендикулярно падающие на поверхность.

Повреждения от солнечных лучей можно разделить на две группы: фотохимические и фотоокислительные процессы.

При повреждении металлических поверхностей существенную роль играет фотоокислительное расщепление. Одновременное воздействие кислорода и влаги создает посредством окислительных процессов дополнительное количество энергии. Поверхность металлов при ультрафиолетовом облучении активируется, поэтому подвергается опасности коррозии. Для расщепления молекулярной структуры необходима определенная частота излучения, т. к. энергия фотона соответствует произведению постоянной Планка на частоту.

Под действием солнечных лучей в органических материалах происходят сложные фотолитические процессы — процессы разложения химических соединений, в результате чего меняются свойства материалов.

Солнечная радиация (особенно ее ультрафиолетовая часть) достаточна для разрушения многих, даже очень сильных, связей в молекулах полимеров, отчего происходит старение и возникают определенные отказы. Процесс старения полимерных материалов ускоряют тепло, влага, кислород воздуха (атмосферное старение), излучения высоких энергий и др. В свою очередь, скорость старения под действием солнечной радиации зависит от ее интенсивности, доли ультрафиолетового излучения в солнечном спектре и лучепоглощающей способности полимеров. Установлено, что разрыв молекулярных связей и процессы старения большинства полимеров происходят при интенсивности радиации, превышающей $16,8 \text{ кДж/(м}^2\cdot\text{мин)}$. Известно, что в основе старения полимерных материалов лежат два одновременно протекающих процесса: **деструкция** — разрыв связей между атомами молекул и образование осколков молекул полимера, и **структурирование** — образование новых связей между атомами и осколками молекул, возникших в результате деструкции. В результате старения полимерных материалов изменяются их механические и электрические свойства, цвет и др.

Основное действие солнечного излучения — нагрев поверхности изделий и, как следствие, повышение температуры внутри устройства. Нагрев

тела солнечными лучами зависит от интенсивности солнечной радиации, температуры окружающей среды и от отражательной способности тела. Будучи нагретым, тело само становится источником излучения. Закономерность теплообмена поверхностей удобно проследить на теплообмене тонкостенного металлического кожуха. Для случая матового черного кожуха, внутри которого нет источника, излучение энергии можно представить схемой на рис. 3.2.

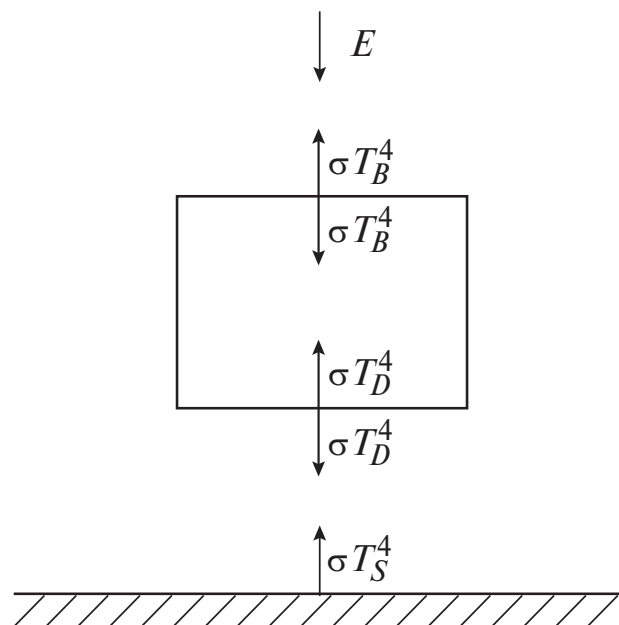


Рис. 3.2. Схема для определения баланса излучения стенок кожуха

Толщина стенок кожуха мала, поэтому можно допустить, что температуры наружных и внутренних поверхностей стенок кожуха одинаковы. Исходя из закона Стефана-Больцмана, составляем баланс излучения стенок кожуха.

Верхняя крышка кожуха, поглощающая тепло солнечных лучей, излучает его наружу и внутрь кожуха (σT_B^4). Нижняя стенка кожуха (дно) поглощает тепло, излучаемое верхней крышкой, и излучает его внутрь кожуха и наружу (σT_D^4). При расположении кожуха на почве нижняя стенка отдает тепло почве и может получать тепло от нее (σT_S^4).

При температурном равновесии системы справедливы следующие математические зависимости:

$$\begin{aligned}\sigma T_B^4 &= (\sigma / 2)(T_D^4 - T_S^4), \\ \sigma T_D^4 &= (1 / 2)(1,6 + \sigma T_B^4),\end{aligned}$$

где: T_B — температура крышки кожуха, K;

T_D — температура дна кожуха, K;

T_S — температура почвы, K;

σ — постоянная излучения (постоянная Стефана-Больцмана).

3.5. Воздействие влажности

При анализе воздействия внешних факторов окружающей среды на конструкционные материалы важны данные об относительной влажности воздуха.

Характер неблагоприятного влияния влажности воздуха на материал зависит от процентного содержания влаги в воздухе. При большом содержании влаги в воздухе (более 90 %) она снижает служебные свойства материалов, проникая внутрь этих материалов или образуя на их поверхности плен-

ки жидкости. При малом содержании влаги в воздухе (ниже 50 %), влага, содержащаяся в материалах, испаряется в воздух, что также изменяет свойства материалов: они становятся хрупкими, в них появляются трещины.

При оценке показателей надежности технических изделий необходимы данные об изменении относительной влажности воздуха во времени. Характер изменения относительной влажности описывается случайным процессом с математическим ожиданием:

$$\bar{\varphi}(t) = C_0 + \sum_{j=1}^n (C_j \cos \omega_j t + D_j \sin \omega_j t),$$

где: C_0 — коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой относительной влажности, %;
 C_j, D_j — амплитуды колебаний математического ожидания влажности, соответствующие частоте ω_j .

Наиболее активно влагу из воздуха поглощают гигроскопические материалы, например изоляционные, изготовленные на основе хлопка и бумаги. Внутри материала влага может проникать при поглощении ее материалом (капиллярная конденсация) или проникновением в структуру полимера (в межмолекулярные промежутки), а также через трещины и крупные поры в материале.

Насыщение влагой таких материалов, как резина и некоторых других, происходит путем осмоса.

Скорость проникания влаги в материалы увеличивается при повышении температуры окружающего воздуха. Влага, поглощенная материалом или проникшая в него другими путями, резко снижает его объемное сопротивление (рис. 3.3). Зависимость удельной электропроводимости диэлектриков от их влажности определяется:

$$\sigma_z = \sigma_{z0} e^{\alpha(z-z_0)},$$

где: σ_{z0} — удельная электропроводимость при $t = 0$ °С;
 z — абсолютная влажность материала;
 α — коэффициент, зависящий от материала.

Оседая на поверхности материала, влага образует тонкую пленку, в результате поверхностное сопротивление материалов снижается на несколько порядков (рис. 3.4). Наибольшее снижение поверхностного сопротивления изоляторов происходит при загрязнении пленки продуктами газов и пыли.

При осаждении влаги на металлические поверхности создаются благоприятные условия для атмосферной коррозии металлов. Этот вид коррозии является наиболее распространенным, и на его долю приходится около половины общих потерь металла от коррозии.

Увлажнение материалов повышает скорость протекания коррозионных процессов:

$$\frac{dy}{dt} = C_p^n k_p \exp\{-E_k / RT\}, \quad (3.5.3)$$

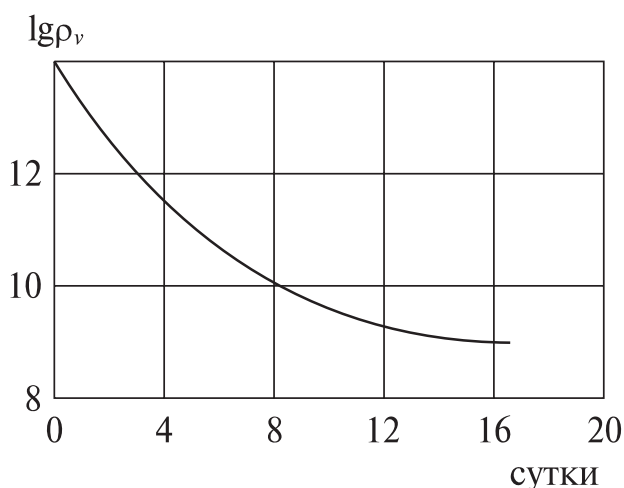


Рис. 3.3. Изменение удельного объемного сопротивления гетинакса в зависимости от длительности увлажнения при относительной влажности воздуха 70—98 % и температуре 35 °C

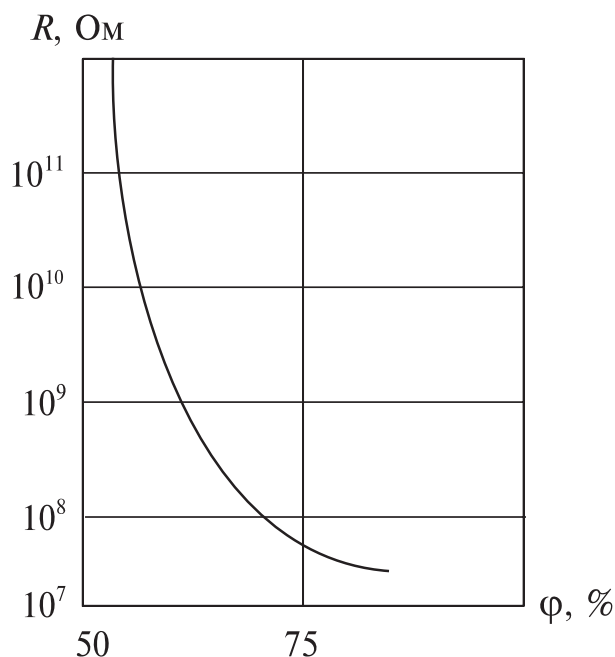


Рис. 3.4. Зависимость поверхностного сопротивления R изоляции керамической детали от влажности воздуха ϕ

где: y — толщина окисной пленки;
 C_p^n — концентрация реагента (кислорода, влаги, агрессивной среды);
 k_p — коэффициент, характеризующий скорость протекания коррозии;
 E_k — энергия активации коррозионного процесса.

Зависимость времени наступления предельного состояния материалов от воздействия внешних условий и качества примененных материалов можно представить в виде:

$$t = 1 / k_0 \cdot \rho(C_0, C_{kp}, \alpha^2, r) \exp\{-E / RT\}, \quad (3.5.4)$$

где: k_0 — постоянный коэффициент,
 $\rho(C_0, C_{kp}, \alpha^2, r)$ — функция, зависящая от внутренних параметров материала.

При повышении влажности воздуха, плотности тумана и оседании росы увеличивается толщина пленки влаги на поверхности металла, которая определяет виды атмосферной коррозии (рис. 4.5). Сухая коррозия (участок I) происходит при отсутствии пленки влаги на поверхности металла вследствие окисления поверхностного микрослоя металла кислородом воздуха, что и определяет малую скорость этого вида коррозии. При влажной коррозии (участок II) скорость коррозии резко повышается с увеличением толщины пленки влаги, образующейся на поверхности вследствие конденсации. Эта конденсация может быть капиллярной, адсорбционной или ионной. При мокрой коррозии (участок III) толщина пленки влаги наибольшая (при 100 % влажности воздуха). Снижение скорости коррозии в этом случае

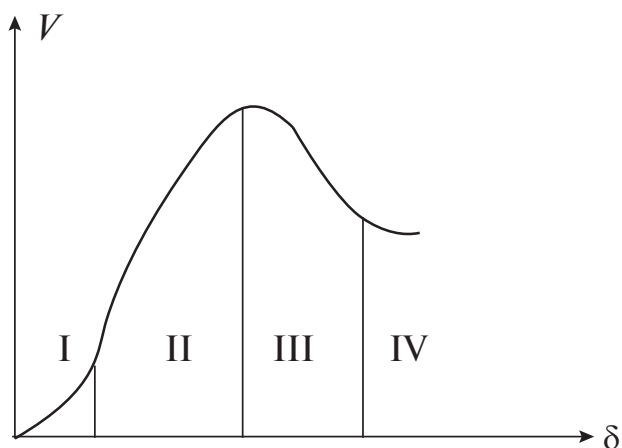


Рис. 3.5. Зависимость скорости V атмосферной коррозии от толщины δ пленки влаги на поверхности металла

объясняется затруднительностью диффузии кислорода воздуха через толстую пленку влаги. Участок IV отвечает случаю погружения металла в жидкость.

Кроме того, влага может вызывать изменение физических свойств материалов — плотности, температуры плавления, снижать грибоустойчивость материалов.

3.6. Воздействие атмосферного давления

На конструкционные материалы немаловажное значение оказывает атмосферное давление.

Атмосферное (барометрическое) давление значительно меняется с изменением высоты местности над уровнем моря.

Изделия наземной техники должны сохранять надежность и заданные эксплуатационные характеристики в пределах изменения атмосферного давления от 505 до 1080 гПа. Верхний предел соответствует давлению, наблюдаемому на уровне моря, нижний — давлению, рассчитанному для максимальной высоты (4,6 км), на которой возможны эксплуатация, хранение, перевозка изделий.

Наибольшее влияние атмосферное давление оказывает на конструкционные материалы систем, используемых при работе в высокогорных условиях. С ростом высоты снижается электрическая прочность воздуха. При значительном уменьшении атмосферного давления воздуха уменьшается напряжение пробоя воздушного промежутка между проводниками. Вероятность пробоя увеличивается на 30 % при снижении давления с 1013 до 709 гПа (с 1 до 0,7 атм.), что отвечает подъему на высоту около 3000 м над уровнем моря. Пониженное давление также влияет на полупроводники, вызывая ухудшение теплоотдачи и уменьшение пробивного напряжения.

3.7. Воздействие ветра и гололеда

На надежность технических систем ветер оказывает разнообразное влияние: в одних случаях — благоприятное, в других — неблагоприятное влияние на процессы в материалах машин. Кроме того, ветер при больших скоростях действует как силовой (нагрузочной) фактор, создавая дополни-

тельные напряжения. Сила ветра зависит от перепада давлений воздуха, т. е. от расстояния между изобарами.

На технические изделия, расположенные вне помещений, действует ветер и гололед. При обледенении увеличивается размер и масса изделий, что приводит к возрастанию действующих на них аэродинамических и физических нагрузок. Кроме того, гололед и гололедица, действуя на влажные гигроскопические материалы, вызывают образование частичек льда в порах, что снижает электрическое сопротивление этих материалов. Наиболее опасна гололедица, возникающая после оттепели и дождя, при резком похолодании. При замерзании влаги, проникшей в материал, происходят микроразрушения этого материала, вызываемые увеличением объема льда.

Оценка влияния гололедно-ветрового режима (ГВР), формируемого случайными метеорологическими факторами (МФ), проводится вероятностно-статистическими методами.

Для расчета интенсивности x параметров гололедно-ветрового режима используют распределение Гудрича:

$$F(x) = \exp\{-K_{x\Gamma} x^{n_{x\Gamma}}\},$$

где: $K_{x\Gamma}$, $n_{x\Gamma}$ — параметры уравнения Гудрича, аппроксимирующие распределение вероятной интенсивности x (определяется по экспериментальным результатам климатологических воздействий).

Исследования статистических связей между толщиной стенки δ эквивалентного гололеда (ЭГ) и максимальными скоростями ветра v при гололедно-изморозительных образованиях (ГИО) показывают, что связь между этими переменными незначительна и уравнение двумерного распределения накопленных относительных частот сочетаний δ и v имеет вид:

$$Q(\delta, v) - 1 - F(\delta, v) = \\ = K_{\delta\Gamma} n_{\delta\Gamma} K_{v\Gamma} \int_0^\delta \int_0^v \left\{ (\delta / \delta_{cp})^{n_{\delta\Gamma}-1} (v / v_{cp})^{n_{v\Gamma}-1} \times \right. \\ \left. \times \exp[-K_{\delta\Gamma} (\delta / \delta_{cp})^{n_{\delta\Gamma}} - K_{v\Gamma} (v / v_{cp})^{n_{v\Gamma}}] \right\} d\delta dv$$

где: $K_{\delta\Gamma}$, $n_{\delta\Gamma}$, $K_{v\Gamma}$, $n_{v\Gamma}$ — параметры уравнения Гудрича, характеризующие режимы ЭГ и ГИО соответственно;
 δ_{cp} , v_{cp} — среднее значение толщины стенки ЭГ и скорости ветра при ГИО соответственно.

При расчете прочности изделий используют метод эквивалентных нагрузок, основанных на обработке графиков загрузки изделий во времени. Для построения этих графиков (рис. 3.6) необходимы сведения о суммарной продолжительности ветра и эквивалентного гололеда (ЭГ) (суммарная продолжительность действий интервала интенсивности МФ).

При переходе льда в жидкую фазу увеличенные размеры пор во многих случаях сохраняются, что создает рыхлость материала. Лед или вода снижа-

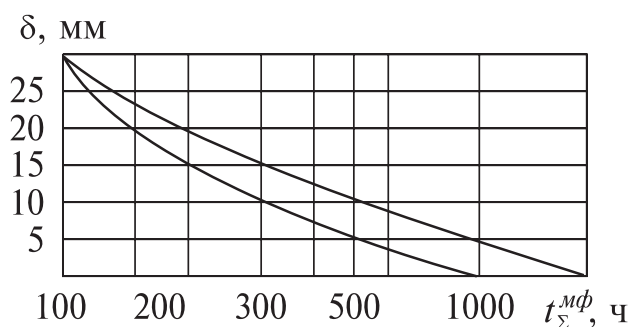


Рис. 3.6. Зависимость толщины стенки ЭГ δ от суммарной продолжительности гололеда $t_{\Sigma}^{мф}$

ют сопротивление электрических проводников. Сухой снег при метелях оказывает истирающее воздействие на поверхности материалов.

Как уже говорилось, ветер оказывает силовое динамическое воздействие на элементы систем.

Распределенная ветровая нагрузка p на $1 м^3$ наветренной поверхности определяется зависимостью:

$$p = q_0 n_h c \beta,$$

где: q_0 — динамическое давление ветра на высоте 10 м над поверхностью земли, Па;

n_h — поправочный коэффициент на увеличение динамического давления в зависимости от высоты над поверхностью земли;

c — аэродинамический коэффициент, зависящий от аэродинамических свойств элементов машины;

β — коэффициент, учитывающий воздействие, вызываемое пульсацией динамического давления ветра.

Динамические нагрузки вызывают наибольшие напряжения, когда частота пульсации ветра совпадает с частотой собственных колебаний элементов.

Скорость ветра во времени изменяется непрерывно и в широких пределах, изменяется и динамическое давление ветра q_0 . На пульсацию давления влияет неоднородность атмосферы, характеристика циркуляции воздуха. Интенсивность пульсации по высоте некоррелирована, и пульсации динамического давления ветра близки к нормальному закону распределения.

Пульсация динамического давления ветра может рассматриваться как стационарный случайный процесс, и при этом дисперсия пульсаций давления ветра характеризуется уравнением (по М. Ф. Барштейну):

$$\overline{S_n^2}(y_s \tau) = \left[\frac{m(y_s) q_{ps}}{k_{\omega}} \right]^2,$$

где: $m(y_s)$ — коэффициент пульсации динамического давления;

q_{ps} — среднее значение динамического давления на S -м участке;

k_{ω} — число средних квадратичных отклонений;

y_s — координаты точки S .

Динамическая нагрузка, определяемая пульсацией динамического ветра с учетом собственных колебаний элемента, будет определяться зависимостью:

$$P_{sq} = M_s \sqrt{\sum_{j=1}^n \bar{\eta}_{sj}^2 \bar{\xi}_j^2},$$

где: M_s — масса S -го участка металлоконструкций;
 n — число степеней свободы металлоконструкций;
 $\bar{\eta}_{sj}$ — среднее значение коэффициента, учитывающего формы деформации металлоконструкции при свободных колебаниях j -го тона;
 $\bar{\xi}_j$ — среднее значение коэффициента динамичности при колебаниях j -го тона.

3.8. Воздействие примесей воздуха

Воздух представляет собой смесь составных частей (азот, кислород, аргон, углекислый газ, неон, гелий, криптон, ксенон), а также содержит некоторое количество различных примесей. Эти примеси образуются из морской воды, от песчаных бурь, от сжигания топлива. В воздухе имеются также бактерии, грибковые споры, космические частицы, неорганические соли и т. д.

Как следствие песчаных бурь, в воздухе периодически содержится значительное количество песка. Перемещаясь в воздухе, частицы твердых веществ (как правило, минералов) диаметром 0,1—2000 мкм при контакте с открытыми поверхностями материалов оказывают на них истирающее воздействие. Твердые частицы пыли и песка способны многократно увеличивать скорости абразивного изнашивания контактирующих поверхностей. Попадая в смазочные материалы, частицы пыли и песка прилипают к слоям защиты поверхности. В результате наблюдается заедание или увеличение «мертвого хода» в подшипниках.

Прочно спекаясь, пыль благоприятствует накоплению электропроводной влаги и снижает сопротивление изоляции. Осаждение пыли облегчает появление токов утечки у твердых изоляционных материалов.

Существенное влияние на конструкционные материалы оказывают содержащиеся в атмосфере коррозионные агенты. Основными повреждающими веществами являются: катион водорода H^+ , диоксид серы, оксиды азота, формальдегид, озон, пероксид водорода. Их повреждающее действие непосредственно обусловлено интенсивностью каталитических реакций с участием металлов, а также синергизмом.

Скорость коррозии металлов в атмосфере определяется продолжительностью увлажнения их поверхности и концентрацией коррозионно-активных компонентов.

Чистый влажный воздух даже при относительной влажности, равной 100 %, слабо действует на железо и медь, однако при наличии в атмосфере всего лишь 0,01 % SO_2 скорость коррозии возрастает в 100 раз.

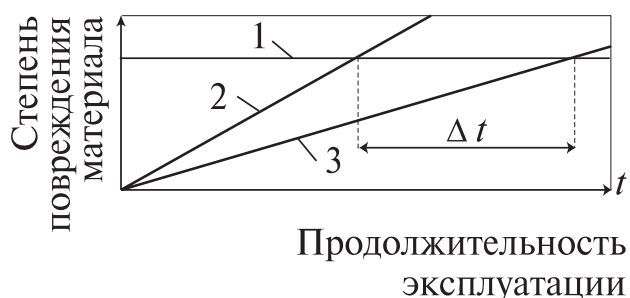


Рис. 3.7. Разрушающее действие на материал и сокращение срока службы изделия t :

- 1 — уровень окончательного разрушения;
 2 — суммарное повреждение от климатических факторов и кислотных дождей;
 3 — повреждение в отсутствии кислотных дождей

Сернистый газ образуется в основном в результате сгорания низкосортных топлив. После сгорания образуется сернистый ангидрид SO_2 , который окисляется в воздухе, образуя в нем серный ангидрид SO_3 , соединяясь с водой SO_3 образует сернистую кислоту H_2SO_3 и серную кислоту H_2SO_4 , которые обладают разрушающим действием. Для определения условия воздействия загрязнений используют зависимость в координатах «концентрация-повреждение». Скорость старения материала, как правило, рассматривают во времени (рис. 3.7).

Высокая эффективность сернистого газа как катодного деполяризатора, способного конкурировать с кислородом и в сочетании с хорошей растворимостью в воде, обуславливает его высокую коррозионную активность.

Соли морского происхождения (большой частью хлориды натрия) в основном оказывают влияние на коррозионные разрушения наружных деталей объектов.

Высокая гигроскопичность хлористого натрия способствует наличию пленки электролита на поверхности даже при сравнительно низкой влажности воздуха. Растворяясь в пленке влаги, хлористый натрий повышает ее электропроводность. Кроме того, ион хлора обладает способностью активно разрушать защитные окисные пленки продуктов коррозии, замещая кислород.

Для процессов атмосферной коррозии характерно несколько основных видов взаимодействия:

- сухая поверхность — газовые примеси; скорость процессов определяется кинетикой сорбции кислых газов и их последующим растворением с образованием кислот;
- влажная поверхность — газовые примеси; скорость процесса лимитируется растворением газов в слое воды, образованием кислоты и скоростью ее взаимодействия с поверхностью металла;
- сухая или влажная поверхность — мелкодисперсные частицы; особенности их действия связаны с осаждением твердых частиц кислотного характера на поверхности с последующим образованием кислот при взаимодействии с влагой;
- прямое действие катионов H^+ , содержащихся в осадках.

При воздействии осадков и газов наиболее часто наблюдается равномерная коррозия, вследствие чего уменьшается толщина материала. Скорость коррозии можно охарактеризовать ее глубиной Π , т. е. глубиной проникно-

вения коррозионного разрушения в металл (в мм) за единицу времени (1 год):

$$П = (8,76 \cdot \gamma) K,$$

где: γ — плотность металла;

K — массовый показатель коррозии.

3.9. Воздействие биологических факторов

Большое воздействие на конструкционные материалы оказывают биологические факторы. Наиболее опасными являются плесневые грибы, споры которых находятся в воздухе. Грибковые образования относятся к низшим растениям, не обладающим свойством фотосинтеза. Взаимодействуя с материалами, грибковые образования выделяют продукты обмена веществ, состоящие главным образом из различного вида кислот, вызывающих разложение изоляционных материалов и пластмасс.

Под действием плесневых грибов ухудшается механическая прочность материалов и изделий. В электронных приборах под действием плесневых грибов нарушаются электрические соединения, и ускоряется коррозия контактов.

Следует отметить большую скорость распространения плесени и огромную (до 40 000) разновидность плесневых грибов. Для ее образования необходимы питательная среда, тепло и малая вентиляция (ее отсутствие) воздуха. Особенно благоприятные условия для образования плесени возникают при функционировании систем в районах с повышенной влажностью и температурой (тропики, субтропики, районы южных морей и крупных озер). Особенно подвержены действию грибковой плесени пластмассы на целлюлозной основе. Плесень появляется и на неорганических изоляционных материалах, стекле и металле.

Защита от грибковой плесени заключается в создании конструкций, препятствующих проникновению влаги; в обеспечении хорошей вентиляции и покрытии уязвимых элементов специальными защитными лаками.

3.10. Старение материалов

Анализ физических процессов, происходящих в материалах элементов систем, показывает, что их состояние и надежность полностью определяются свойствами материалов, комплексным характером внешних воздействий и факторов нагрузки.

Для основных материалов имеются зависимости протекания физико-химических процессов, вызывающих старение и изменение механических, электрических и магнитных свойств материалов, от характера и количественных показателей воздействующих факторов.

Старение материалов обусловлено в основном рекристаллизацией материалов, диффузией, хемосорбцией, химическими реакциями, коррозионными процессами и увлажнением, вызывающих изменение начальных свойств материалов, из которых изготовлены элементы. Эти изменения могут привести к повреждению элемента и к опасности возникновения критического отказа системы.

Старение материалов вызывает снижение значений их характеристик во времени. Характер этого снижения определяется начальными свойствами, напряженным состоянием материала, интенсивностью воздействия

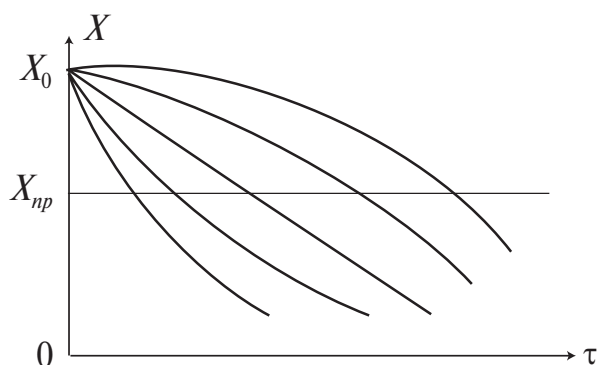


Рис. 3.8. Схема снижения свойств материалов в процессе старения

внешних факторов. Во всех случаях старение материалов представляет собой необратимый процесс.

В общем виде процесс снижения свойств материалов может быть представлен некоторыми кривыми (рис. 3.8). В зависимости от назначения материала снижение его свойств допустимо до некоторых предельных значений X_{np} , это и определяет продолжительность использования материала.

Протекание процесса старения. Для расчета надежности необходимо знать скорость протекания процесса повреждения $f(g)$ или степень данного повреждения $U(t)$ в функции времени.

Такие зависимости могут быть получены на основе рассмотрения физики процесса или экспериментальным путем.

В табл. 3.3 для металлов представлены типовые закономерности протекания процессов старения во времени. Они относятся к одностадийным процессам, когда в течение рассматриваемого периода не происходит изменения физико-химической картины процесса.

В табл. 3.4 дана классификация процессов старения по месту их протекания и внешнему проявлению и указаны основные разновидности каждого процесса. Наиболее просто протекают стационарные процессы, когда скорость процесса постоянна или колеблется относительно среднего значения. Это происходит в том случае, если факторы, влияющие на скорость процесса, стабилизировались и нет причин, изменяющих интенсивность процесса. Зависимость $U(t)$ имеет обычно линейный или близкий к нему характер. Такая закономерность характерна для установившегося периода изнашивания, для некоторых видов коррозии и других процессов. Если при старении возникают факторы, которые интенсифицируют или, наоборот, замедляют скорость его протекания, т. е. скорость процесса g изменяется монотонно, функция $U(t)$ будет иметь нелинейный вид и соответственно описывать ускорение или затухание процесса повреждения материала. Ход процесса в этом случае связан с тем, что его скорость зависит не только от внешних

Таблица 3.3

Типовые закономерности протекания процессов старения во времени

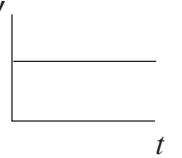
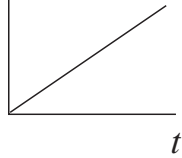
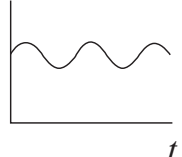
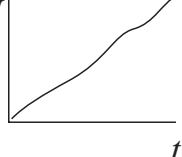
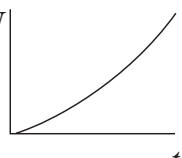
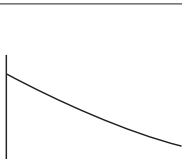
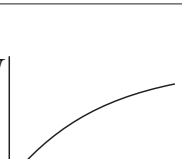
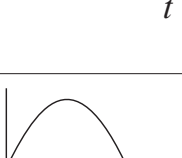
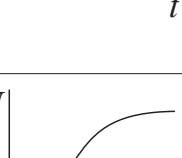
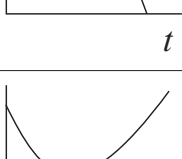
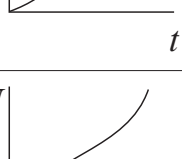
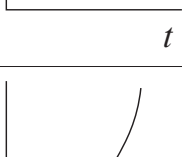
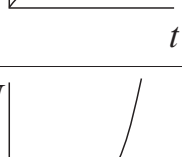
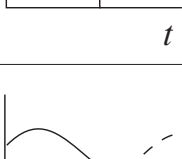
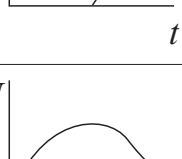
Процессы (по γ -характеристике)		$\gamma(t) = dU / dt$	$U(t)$	Примеры
Стационарные	Постоянные			Износ: $U = kt$
	Псевдостационарные			Износ при переменных режимах
Монотонные	Возрастающие			Износ при засорении поверхностей: $U = kt^n; n > 1;$ $U = A(e^{kt} - 1)$
	Убывающие			Износ в период приработки, распад мартенсита: $U = kt^n; n < 1;$ $U = A(1 - e^{-kt})$
Экстремальные	С максимумом			Коррозия, коробление $\gamma = ate^{-bt}$
	С минимумом			Ползучесть, износ, коррозия
С запаздыванием				Усталость, хрупкое разрушение
Знакопеременные				Изменение механических характеристик

Таблица 3.4

Классификация процессов старения

Объект	Внешнее проявление	Разновидности процесса
Тело детали (объемные явления)	Разрушение	Хрупкое разрушение
	Деформация	Пластическая деформация
	Изменение свойств материала	Изменение структуры, механических свойств (пластичность), химического состава, магнитных свойств, газопроницаемости, загрязнение жидкостей (смазочного материала, топлива)
Поверхность (поверхностные явления)	Разъедание	Коррозия, эрозия, кавитация, прогар, трещинообразование
	Нарост	Налипание (адгезия, когезия, адсорбция, диффузия), нагар, облитерация (заращивание)
	Изменение свойств поверхностного слоя	Изменение шероховатости, твердости, отражательной способности, напряженного состояния
	Износ	Износ (истирание), усталость поверхностных слоев, смятие, перенос материала
	Изменение условий контакта	Изменение площади контакта, глубины внедрения микровыступов, трения

факторов, но и от степени повреждения U . Поэтому сам процесс (его результат) влияет на интенсивность дальнейшего его протекания. Это условие можно записать как:

$$dU / dt = f(U),$$

В некоторых случаях, когда на скорость процесса одновременно действует ряд равноценных факторов, которые претерпевают изменение во времени, зависимость $g(t)$ может иметь экстремум (максимум или минимум). В этом случае функция $U(t)$ имеет точку перегиба. Такая зависимость характерна, например, для перераспределения внутренних напряжений и деформаций в отливках в процессе их эксплуатации.

Существует определенная категория процессов, для которых вначале происходит накопление каких-то внутренних повреждений, а затем, с некоторым запаздыванием, начинается сам процесс.

Если в процессе с запаздыванием время до начала процесса (порог чувствительности) является основным периодом эксплуатации элемента, а сам процесс протекает с большой интенсивностью, то такое явление воспринимается обычно как спонтанный (самопроизвольно возникающий) процесс. Так, хрупкое разрушение металлов носит лавинообразный характер и возникает после накопления внутренних напряжений или при неблагоприятном сочетании внешних воздействий.

Если скорость процесса меняет знак, что характерно для сложных физико-химических процессов, протекающих в материале, функция $U(t)$, характеризующая степень повреждения, будет иметь экстремум.

При протекании различных процессов старения могут быть случаи, когда изменяется физическая сущность процессов и, соответственно, меняется закономерность, описывающая данные явления. Такие процессы называются многостадийными. Для их описания, как правило, применяют законы для каждой стадии процесса $\gamma(t)$ и $U(t)$.

Все рассмотренные функциональные зависимости, определяющие протекание процесса старения, проявляются при эксплуатации систем как **случайные** процессы. Это связано с двумя основными причинами. Во-первых, начальные свойства материала и параметры элемента имеют рассеяние, так как являются продуктом некоторого технологического процесса, который может функционировать лишь с определенной точностью и стабильностью. Во-вторых, стохастическая природа процесса старения связана с широкой вариацией режимов работы и условий эксплуатации. В результате зависимости, описывающие процессы старения, становятся функциями случайных аргументов — нагрузок, скоростей, температур и т. п.

Поэтому скорость процесса старения γ является случайной величиной, и ее полной характеристикой будет закон распределения $f(\gamma)$. Для получения $f(\gamma)$ экспериментальным методом применяется физико-статистическое моделирование, при котором испытание производят при различных значениях внешних факторов, а значения этих факторов принимают в соответствии с законом их распределения, отражающим условия эксплуатации. Применяя метод статистического моделирования (метод Монте-Карло), определяют закон распределения и его характеристики для искомой величины — скорости процесса повреждения.

3.11. Факторы нагрузки

Эти факторы связаны с **режимом работы** элементов системы, свойственным им независимо от того, наблюдается воздействие того или иного фактора (климатического, биологического и др.) на элемент или это воздействие отсутствует, и **энергией**, накопленной материалом элементов системы.

Механическая энергия приводит к изнашиванию сопряжений, искажению первоначальной формы элементов, и при достижении определенных

отклонений от первоначальных значений возникает отказ. Таким образом, нарушается основное условие, предопределяющее безопасную работу оборудования, которое заключается в том, что его составные части должны выдерживать заданные рабочие нагрузки и, как следствие, обеспечивать безопасность окружающей среды.

К причинам механических повреждений элементов и систем в целом относятся:

- конструкции, не обеспечивающие их целостность при перепадах внутреннего давления, действии внешних сил, коррозии, изменении температуры, знакопеременных нагрузках;
- механические поломки вследствие коррозии и ударов;
- поломки таких узлов, как насосы и компрессоры, вентиляторы;
- неисправности в системе контроля (датчики давления и температуры, индикаторы уровня, приборы управления и т. д.);
- неисправности в системе безопасности (предохранительные клапаны, системы сброса давления, системы нейтрализации и т. д.);
- нарушение сварных швов и соединительных фланцев.

В механических системах изменение силы, воздействующей на элементы, изменяет нагрузку, приходящуюся на эти элементы, что приводит к большему или меньшему накоплению признаков усталости, а следовательно, к изменению величины вероятности разрушения элемента за определенный промежуток времени.

Параметром, определяющим степень нагрузки составляющих систему элементов, зависящей от его режима работы, является **коэффициент нагрузки**, представляющий собой отношение рабочей нагрузки (A_p), действующей на элемент, к номинальному значению нагрузки (A_n), обусловленному нормативами (техническими условиями): $K_n = A_p / A_n$. Расчеты значений K_n для элементов различных систем не всегда просты, и в ряде случаев необходимы экспериментальные исследования.

Химическая энергия вызывает процессы коррозии в резервуарах и трубопроводах агрегатов химической промышленности. Повреждение стенок резервуаров может привести вначале к ухудшению выходных параметров агрегата (загрязнение химических веществ, изменение пропускных сечений трубопроводов), а затем, при разрушении стенок, к полному выходу из строя системы.

В радиоэлектронной и электрической аппаратуре в различных режимах ее работы может изменяться **электрическая нагрузка** на составные элементы, в связи с чем (при прочих равных условиях эксплуатации) меняется значение интенсивности их отказов.

Г Л А В А 4

Основы теории расчета надежности технических систем

Теория надежности — сравнительно молодая научно-техническая дисциплина, формирование которой в современном виде относится к 50-м годам XX столетия. Первые шаги в области исследований надежности были связаны со сбором статистических данных о надежности радиоэлементов, а все усилия специалистов были направлены на определение причин ненадежности. Следующими шагами стали: развитие физической надежности (физики отказов) и развитие математических основ теории надежности, явившихся обязательным атрибутом разработки и проектирования сложных и ответственных технических систем. В этом ракурсе под теорией надежности понимают научную дисциплину, которая изучает закономерности сохранения во времени техническими системами свойства выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов и транспортирования.

Основные вопросы, которые изучает теория надежности: отказы технических элементов (средств, систем); 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.

В конкретных областях техники разрабатывались и продолжают разрабатываться прикладные вопросы надежности, вопросы обеспечения надежности данной конкретной техники (радиоэлектронные приборы, средства вычислительной техники, транспортные машины, продуктопроводы, химические реакторы и т. д.). При этом решается вопрос о наиболее рациональном использовании общей теории надежности в конкретной области техники и ведется разработка таких новых положений, методов и приемов, которые отражают специфику данного вида техники. Так возникла прикладная теория 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, 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.

4.1. Основные понятия теории надежности

4.1.1. Предварительные замечания

В основу перечня положен ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения», формулирующий применяемые в науке и технике термины и определения в области надежности. Однако не все термины охватываются указанным ГОСТом, поэтому в отдельных пунктах введены дополнительные термины, отмеченные «звездочкой» (*).

4.1.2. Объект, элемент, система

В теории надежности используют понятия **объект**, **элемент**, **система**.

Объект — техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности: сооружения, установки, технические изделия, устройства, машины, аппараты, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали.

Элемент системы — объект, представляющий отдельную часть системы. Само понятие элемента условно и относительно, так как любой элемент, в свою очередь, всегда можно рассматривать как совокупность других элементов.

Понятия **система** и **элемент** выражены друг через друга, поскольку одно из них следовало бы принять в качестве исходного, постулировать. Понятия эти относительны: объект, считавшийся системой в одном исследовании, может рассматриваться как элемент, если изучается объект большего масштаба. Кроме того, само деление системы на элементы зависит от характера

рассмотрения (функциональные, конструктивные, схемные или оперативные элементы), от требуемой точности проводимого исследования, от уровня наших представлений, от объекта в целом.

Человек-оператор также представляет собой одно из звеньев системы **человек-машина**.

Система — объект, представляющий собой совокупность элементов, связанных между собой определенными отношениями взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение системой некоторой достаточно сложной функции.

Признаком системности является структурированность системы, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели. Системы функционируют в пространстве и времени.

4.1.2.1. Состояние объекта

Исправность — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

Неисправность — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных НТД.

Работоспособность — состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных НТД.

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач и устанавливаются нормативно-технической документацией.

Неработоспособность — состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным НТД.

Понятие **исправность** шире, чем понятие **работоспособность**. Работоспособный объект в отличие от исправного удовлетворяет лишь тем требованиям НТД, которые обеспечивают его нормальное функционирование при выполнении поставленных задач.

Работоспособность и неработоспособность в общем случае могут быть полными или частичными. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определенных условиях максимальную эффективность его применения. Эффективность применения в этих же условиях частично работоспособного объекта меньше максимально возможной, но значения ее показателей при этом еще находятся в пределах, установленных для такого функционирования, которое считается нормальным. Частично неработоспособный объект может функционировать, но уровень эффективности при этом ниже допустимого. Полностью неработоспособный объект применять по назначению невозможно.

Понятия частичной работоспособности и частичной неработоспособности применяют главным образом к сложным системам, для которых характерна возможность нахождения в нескольких состояниях. Эти состояния различаются уровнями эффективности функционирования системы. Работоспособность и неработоспособность некоторых объектов могут быть полными, т.е. они могут иметь только два состояния.

Работоспособный объект в отличие от исправного обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. При этом он может не удовлетворять, например, эстетическим требованиям, если ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его нормальному (эффективному) функционированию.

Очевидно, что работоспособный объект может быть неисправным, однако отклонения от требований НТД при этом не настолько существенны, чтобы нарушалось нормальное функционирование.

Предельное состояние — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению должно быть прекращено из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого отклонения заданных параметров за установленные пределы, недопустимого увеличения эксплуатационных расходов или необходимости проведения капитального ремонта.

Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются НТД на данный объект.

Невосстанавливаемый объект достигает предельного состояния при возникновении отказа или при достижении заранее установленного предельно допустимого значения срока службы или суммарной наработки, устанавливаемых из соображений безопасности эксплуатации в связи с необратимым снижением эффективности использования ниже допустимой или в связи с увеличением интенсивности отказов, закономерным для объектов данного типа после установленного периода эксплуатации.

Для восстанавливаемых объектов переход в предельное состояние определяется наступлением момента, когда дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна вследствие следующих причин:

- становится невозможным поддержание его безопасности, безотказности или эффективности на минимально допустимом уровне;
- в результате изнашивания и (или) старения объект пришел в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает необходимой степени восстановления исправности или ресурса.

Для некоторых восстанавливаемых объектов предельным состоянием считается такое, когда необходимое восстановление исправности может быть осуществлено только с помощью капитального ремонта.

Режимная управляемость* — свойство объекта поддерживать нормальный режим посредством управления с целью сохранения или восстановления нормального режима его работы.

Живучесть* — свойство объекта противостоять локальным возмущениям и отказам, не допуская их системного развития с массовыми отказами.

Безопасность* — свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

4.1.2.2. Переход объекта в различные состояния

Повреждение — событие, заключающееся в нарушении исправности объекта при сохранении его работоспособности.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

Критерий отказа — отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт отказа.

Признаки (критерии) отказов устанавливаются НТД на данный объект.

Восстановление — процесс обнаружения и устранения отказа (повреждения) с целью восстановления его работоспособности (исправности).

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.

При анализе надежности, особенно при выборе показателей надежности объекта, существенное значение имеет решение, которое должно быть принято в случае отказа объекта. Если в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособности данного объекта при его отказе по каким-либо причинам признается нецелесообразным или неосуществимым (например, из-за невозможности прерывания выполняемой функции), то такой объект в данной ситуации является невосстанавливаемым. Таким образом, один и тот же объект в зависимости от особенностей или этапов эксплуатации может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Например, аппаратура метеоспутника на этапе хранения относится к восстанавливаемой, а во время полета в космосе — невосстанавливаемой. Более того, даже один и тот же объект можно отнести к тому или иному типу в зависимости от назначения: ЭВМ, используемая для неоперативных вычислений, является объектом восстанавливаемым, так как в случае отказа любая операция может быть повторена, а та же ЭВМ, управляющая сложным технологическим процессом в химии, является объектом невосстанавливаемым, так как отказ или сбой приводит к непоправимым последствиям.

Авария* — событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня работоспособности или относительного уровня функционирования на другой, существенно более низкий, с крупным нарушением режима работы

объекта. Авария может привести к частичному или полному разрушению объекта, созданию опасных условий для человека и окружающей среды.

4.1.2.3. Временные характеристики объекта

Наработка — продолжительность или объем работы объекта. Объект может работать непрерывно или с перерывами. Во втором случае учитывается суммарная наработка. Нарработка может измеряться в единицах времени, циклах, единицах выработки и других единицах. В процессе эксплуатации различают суточную, месячную наработку, наработку до первого отказа, наработку между отказами, заданную наработку и т. д.

Если объект эксплуатируется в различных режимах нагрузки, то, например, наработка в облегченном режиме может быть выделена и учитываться отдельно от наработки при номинальной нагрузке.

Технический ресурс — наработка объекта от начала его эксплуатации до достижения предельного состояния.

Обычно указывается, какой именно технический ресурс имеется в виду: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего и т. п. Если конкретного указания не содержится, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех (средних и капитальных) ремонтов, т.е. до списания по техническому состоянию.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после капитального или среднего ремонта до наступления предельного состояния.

Под **эксплуатацией** объекта понимается стадия его существования в распоряжении потребителя при условии применения объекта по назначению, что может чередоваться с хранением, транспортированием, техническим обслуживанием и ремонтом, если это осуществляется потребителем.

Срок сохраняемости — календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта в заданных условиях, в течение и после которой сохраняются значения установленных показателей (в том числе и показателей надежности) в заданных пределах.

4.1.3. Определение надежности

Работа любой технической системы может характеризоваться ее эффективностью (рис. 4.1.1), под которой понимается совокупность свойств, определяющих способность системы успешно выполнять определенные задачи.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 под **надежностью** понимают свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

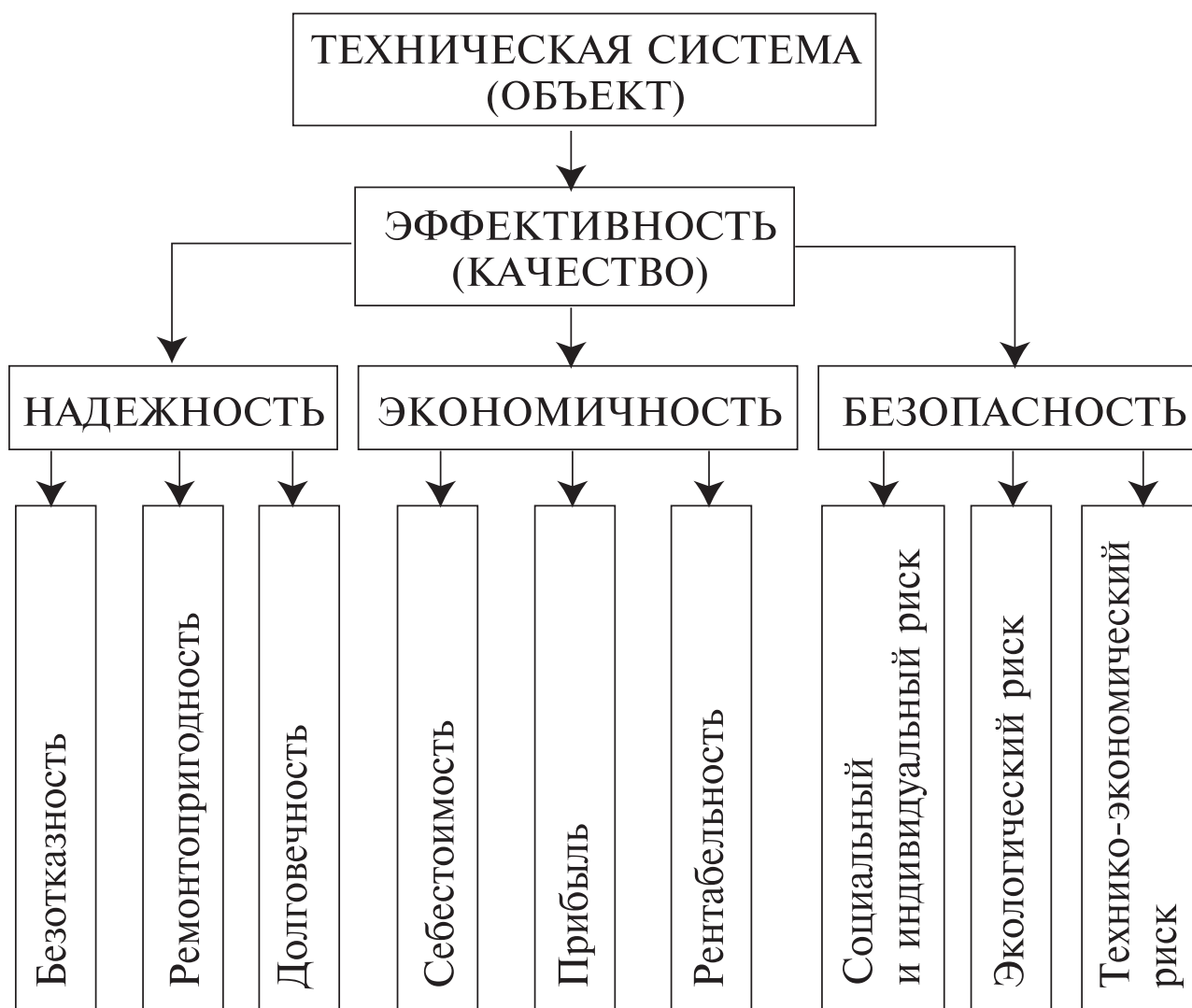


Рис. 4.1.1. Основные свойства технических систем

Таким образом:

1. Надежность — свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции. Например: для электродвигателя — обеспечивать требуемые момент на валу и скорость; для системы электроснабжения — обеспечивать электроприемники энергией требуемого качества.

2. Выполнение требуемых функций должно происходить при значениях параметров в установленных пределах. Например: для электродвигателя — обеспечивать требуемые момент и скорость при температуре двигателя, не превышающей определенного предела, отсутствии выделения источника взрыва, пожара и т.д.

3. Способность выполнять требуемые функции должна сохраняться в заданных режимах (например, в повторно-кратковременном режиме работы); в заданных условиях (например, в условиях запыленности, вибрации и т. д.).

4. Объект должен обладать свойством сохранять способность выполнять требуемые функции в различные фазы: при рабочей эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте, хранении и транспортировке.

Надежность — важный показатель качества объекта. Его нельзя ни противопоставлять, ни смешивать с другими показателями качества. Явно недостаточной, например, будет информация о качестве очистительной установки, если известно только то, что она обладает определенной производительностью и некоторым коэффициентом очистки, но неизвестно, насколько устойчиво сохраняются эти характеристики при ее работе. Бесполезна также информация о том, что установка устойчиво сохраняет присущие ей характеристики, но неизвестны значения этих характеристик. Вот почему в определение понятия надежности входит выполнение заданных функций и сохранение этого свойства при использовании объекта по назначению.

В зависимости от назначения объекта оно (понятие) может включать в себя в различных сочетаниях безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Например, для невосстанавливаемого объекта, не предназначенного для хранения, надежность определяется его безотказностью при использовании по назначению. Информация о безотказности восстанавливаемого изделия, длительное время находящегося в состоянии хранения и транспортировки, не в полной мере определяет его надежность (при этом необходимо знать и о ремонтпригодности, и сохраняемости). В ряде случаев очень важное значение приобретает свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния (снятие с эксплуатации, передача в средний или капитальный ремонт), т. е. необходима информация не только о безотказности объекта, но и о его долговечности.

Техническая характеристика, количественным образом определяющая одно или несколько свойств, составляющих надежность объекта, именуется **показатель надежности**. Он количественно характеризует, в какой степени данному объекту или данной группе объектов присущи определенные свойства, обуславливающие надежность. Показатель надежности может иметь размерность (например, среднее время восстановления) или не иметь ее (например, вероятность безотказной работы).

Надежность в общем случае — комплексное свойство, включающее такие понятия, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени.

Ремонтпригодность — свойство объекта быть приспособленным к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, к восстановлению работоспособности и исправности в процессе технического обслуживания и ремонта.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимым прерыванием для технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость — свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение (и после) хранения и (или) транспортировки.

Для показателей надежности используются две формы представления: **вероятностная** и **статистическая**. Вероятностная форма обычно бывает удобнее при априорных аналитических расчетах надежности, статистическая — при экспериментальном исследовании надежности технических систем. Кроме того, оказывается, что одни показатели лучше интерпретируются в вероятностных терминах, а другие — в статистических.

4.1.3.1. Показатели безотказности и ремонтпригодности

Наработка до отказа — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет (при условии работоспособности в начальный момент времени).

Для режимов хранения и транспортировки может применяться аналогично определяемый термин «**вероятность возникновения отказа**».

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание случайной наработки объекта до первого отказа.

Средняя наработка между отказами — математическое ожидание случайной наработки объекта между отказами.

Обычно этот показатель относится к установившемуся процессу эксплуатации. В принципе средняя наработка между отказами объектов, состоящих из стареющих во времени элементов, зависит от номера предыдущего отказа. Однако с ростом номера отказа (т.е. с увеличением длительности эксплуатации) эта величина стремится к некоторой постоянной, или, как говорят, к своему стационарному значению.

Средняя наработка на отказ — отношение наработки восстанавливаемого объекта за некоторый период времени к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки.

Этим термином можно назвать кратко **среднюю наработку до отказа** и **среднюю наработку между отказами**, когда оба показателя совпадают. Для совпадения последних необходимо, чтобы после каждого отказа объект восстанавливался до первоначального состояния.

Заданная наработка — наработка, в течение которой объект должен безотказно работать для выполнения своих функций.

Среднее время простоя — математическое ожидание случайного времени вынужденного нерегламентированного пребывания объекта в состоянии неработоспособности.

Среднее время восстановления — математическое ожидание случайной продолжительности восстановления работоспособности (собственно ремонта).

Вероятность восстановления — вероятность того, что фактическая продолжительность восстановления работоспособности объекта не превысит заданной.

Показатель технической эффективности функционирования — мера качества собственно функционирования объекта или целесообразности использования объекта для выполнения заданных функций.

Этот показатель определяется количественно как математическое ожидание выходного эффекта объекта, т. е. в зависимости от назначения системы принимает конкретное выражение. Часто показатель эффективности функционирования определяется как полная вероятность выполнения объектом задачи с учетом возможного снижения качества его работы из-за возникновения частичных отказов.

Коэффициент сохранения эффективности — показатель, характеризующий влияние степени надежности к максимально возможному значению этого показателя (т. е. соответствующему состоянию полной работоспособности всех элементов объекта).

Нестационарный коэффициент готовности — вероятность того, что объект окажется работоспособным в заданный момент времени, отсчитываемый от начала работы (или от другого строго определенного момента времени), для которого известно начальное состояние этого объекта.

Средний коэффициент готовности — усредненное на заданном интервале времени значение нестационарного коэффициента готовности.

Стационарный коэффициент готовности (коэффициент готовности) — вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени в установившемся процессе эксплуатации. Коэффициент готовности может быть определен и как отношение времени, в течение которого объект находится в работоспособном состоянии, к общей длительности рассматриваемого периода. Предполагается, что рассматривается установившийся процесс эксплуатации, математической моделью которого является стационарный случайный процесс. Коэффициент готовности является предельным значением, к которому стремятся и нестационарный, и средний коэффициенты готовности с ростом рассматриваемого интервала времени.

Часто используются показатели, характеризующие простой объект, так называемые коэффициенты простоя соответствующего типа. Каждому коэффициенту готовности можно поставить в соответствие определенный **коэффициент простоя**, численно равный дополнению соответствующего коэффициента готовности до единицы. В соответствующих определениях работоспособность следует заменить на неработоспособность.

Нестационарный коэффициент оперативной готовности — вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в заданный момент времени, отсчитываемый от начала работы (или от другого строго определенного времени), и начиная с этого момента времени будет работать безотказно в течение заданного времени.

Средний коэффициент оперативной готовности — усредненное на заданном интервале значение нестационарного коэффициента оперативной готовности.

Стационарный коэффициент оперативной готовности (коэффициент оперативной готовности) — вероятность того, что восстанавливаемый элемент окажется работоспособным в произвольный момент времени, и с этого момента времени будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Предполагается, что рассматривается установившийся процесс эксплуатации, которому соответствуют в качестве математической модели стационарный случайный процесс.

Коэффициент технического использования — отношение средней наработки объекта в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме средних значений наработки, времени простоя, обусловленного техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации.

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности отказа невозстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

Параметр потока отказов — плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени.

Параметр потока отказа может быть определен как отношение числа отказов объекта за определенный интервал времени к длительности этого интервала при ординарном потоке отказов.

Интенсивность восстановления — условная плотность вероятности восстановления работоспособности объекта, определенная для рассматриваемого момента времени, при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

4.1.3.2. Показатели долговечности и сохраняемости

Гамма-процентный ресурс — наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью $1 - \gamma$.

Средний ресурс — математическое ожидание ресурса.

Назначенный ресурс — суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Средний ремонтный ресурс — средний ресурс между смежными капитальными ремонтами объекта.

Средний ресурс до списания — средний ресурс объекта от начала эксплуатации до его списания.

Средний ресурс до капитального ремонта — средний ресурс от начала эксплуатации объекта до его первого капитального ремонта.

Гамма-процентный срок службы — срок службы, в течение которого объект не достигает предельного состояния с вероятностью $1 - \gamma$.

Средний срок службы — математическое ожидание срока службы.

Средний межремонтный срок службы — средний срок службы между смежными капитальными ремонтами объекта.

Средний срок службы до капитального ремонта — средний срок службы от начала эксплуатации объекта до его первого капитального ремонта.

Средний срок службы до списания — средний срок службы от начала эксплуатации объекта до его списания.

Гамма-процентный срок сохраняемости — продолжительность хранения, в течение которой у объекта сохраняются установленные показатели с заданной вероятностью $1 - \gamma$.

Средний срок сохраняемости — математическое ожидание срока сохраняемости.

4.1.4. Виды надежности

Многоцелевое назначение оборудования и систем приводит к необходимости исследовать те или другие стороны надежности с учетом причин, формирующих надежностные свойства объектов. Это приводит к необходимости подразделения надежности на виды. Различают:

- **аппаратурную надежность**, обусловленную состоянием аппаратов; в свою очередь она может подразделяться на надежность конструктивную, схемную, производственно-технологическую;
- **функциональную надежность**, связанную с выполнением некоторой функции (либо комплекса функций), возлагаемых на объект, систему;
- **эксплуатационную надежность**, обусловленную качеством использования и обслуживания;
- **программную надежность**, обусловленную качеством программного обеспечения (программ, алгоритмов действий, инструкций и т. д.);
- **надежность системы «человек-машина»**, зависящую от качества обслуживания объекта человеком-оператором.

4.1.5. Характеристики отказов

Одним из основных понятий теории надежности является понятие отказа (объекта, элемента, системы).

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**. Понятия полного и частичного отказов каждый раз должны быть четко сформулированы перед анализом надежности, поскольку от этого зависит количественная оценка надежности.

Причины возникновения отказов происходят из-за:

- конструктивных дефектов;
- технологических дефектов;
- эксплуатационных дефектов;
- постепенного старения (износа).

Отказы вследствие конструктивных дефектов возникают как следствие несовершенства конструкции из-за «промахов» при конструировании. В этом случае наиболее распространенными являются недоучет «пиковых» нагрузок, применение материалов с низкими потребительскими свойствами, схемные «промахи» и др. Отказы этой группы сказываются на всех экземплярах изделия, объекта, системы.

Отказы из-за технологических дефектов возникают как следствие нарушения принятой технологии изготовления изделий (например, выход отдельных характеристик за установленные пределы). Отказы этой группы характерны для отдельных партий изделий, при изготовлении которых наблюдались нарушения технологии изготовления.

Отказы из-за эксплуатационных дефектов возникают по причине несоответствия требуемых условий эксплуатации, правил обслуживания действительным. Отказы этой группы характерны для отдельных экземпляров изделий.

Отказы из-за постепенного старения (износа) вследствие накопления необратимых изменений в материалах, приводящих к нарушению прочности (механической, электрической), взаимодействия частей объекта.

Отказы по **причинным схемам возникновения** подразделяются на следующие группы:

- отказы с мгновенной схемой возникновения;
- отказы с постепенной схемой возникновения;
- отказы с релаксационной схемой возникновения;
- отказы с комбинированными схемами возникновения.

Отказы с мгновенной схемой возникновения характеризуются тем, что время наступления отказа не зависит от времени предшествующей эксплуатации и состояния объекта, момент отказа наступает случайно, внезапно. Примерами реализации такой схемы могут служить отказы изделий под действием пиковых нагрузок в электрической сети, механическое разрушение посторонним внешним воздействием и т. п.

Отказы с постепенной схемой возникновения происходят за счет постепенного накопления вследствие физико-химических изменений в материалах повреждений. При этом значения некоторых «решающих» параметров выходят за допустимые границы, и объект (система) не способен выполнять заданные функции. Примерами реализации постепенной схемы возникновения могут служить отказы вследствие снижения сопротивления изоляции, электрической эрозии контактов и т. п.

Отказы с релаксационной схемой возникновения характеризуются первоначальным постепенным накоплением повреждений, которые создают условия для скачкообразного (резкого) изменения состояния объекта, после которого возникает отказное состояние. Примером реализации релаксационной схемы возникновения отказов может служить пробой изоляции кабеля вследствие коррозионного разрушения брони.

Отказы с комбинированными схемами возникновения характерны для ситуаций, когда одновременно действуют несколько причинных схем. Примером, реализующим эту схему, может служить отказ двигателя в результате короткого замыкания по причинам снижения сопротивления изоляции обмоток и перегрева.

При анализе надежности необходимо выявлять преобладающие причины отказов и лишь затем, если в этом есть необходимость, учитывать влияние остальных причин.

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

По характеру устранения с течением времени различают **устойчивые (окончательные)** и **самоустраняющиеся (кратковременные)** отказы. Кратковременный отказ называется сбоем. Характерный признак сбоя — то, что восстановление работоспособности после его возникновения не требует ремонта аппаратуры. Примером может служить кратковременно действующая помеха при приеме сигнала, дефекты программы и т. п.

Для анализа и исследования надежности причинные схемы отказов можно представить в виде статистических моделей, которые вследствие вероятностного возникновения повреждений описываются вероятностными законами.

4.1.6. Виды отказов и причинные связи

Отказы элементов систем являются основными предметами исследования при анализе причинных связей.

Как показано во внутреннем кольце (рис. 4.1.2), расположенном вокруг «отказа элементов», отказы могут возникать в результате:

- 1) первичных отказов;
- 2) вторичных отказов;
- 3) ошибочных команд (инициированные отказы).

Отказы всех этих категорий могут иметь различные причины, приведенные в наружном кольце. Когда точный вид отказов определен и данные по ним получены, а конечное событие является критическим, то они рассматриваются как **исходные отказы**.

Первичный отказ элемента определяют как нерабочее состояние этого элемента, причиной которого является он сам, и необходимо выполнить ремонтные работы для возвращения элемента в рабочее состояние. Первичные отказы происходят при входных воздействиях, значение которых находится в пределах, лежащих в расчетном диапазоне, а отказы объясняются естественным старением элементов. Разрыв резервуара вследствие старения (усталости) материала служит примером первичного отказа.

Вторичный отказ — такой же, как первичный, за исключением того, что сам элемент не является причиной отказа. Вторичные отказы объясняются воздействием предыдущих или текущих избыточных напряжений на элементы. Амплитуда, частота, продолжительность действия этих напряжений

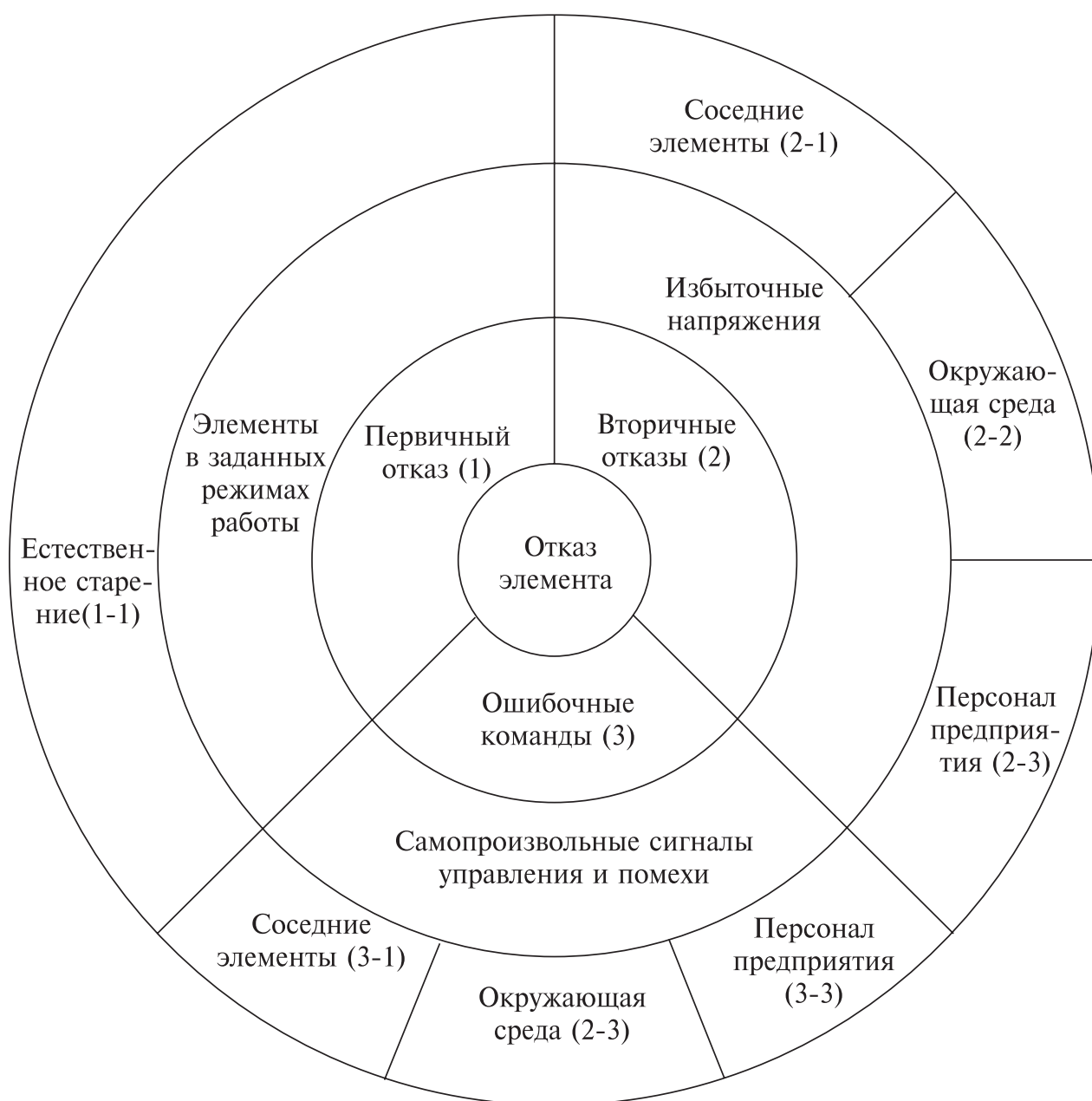


Рис. 4.1.2. Характеристики отказов элементов

могут выходить за пределы допусков или иметь обратную полярность и вызываются различными источниками энергии: термической, механической, электрической, химической, магнитной, радиоактивной и т.п. Эти напряжения вызываются соседними элементами или окружающей средой, например — метеорологическими (ливень, ветровая нагрузка), геологическими условиями (оползни, просадка грунтов), а также воздействием со стороны других технических систем.

Примером вторичных отказов служит «срабатывание предохранителя от повышенного электрического тока», «повреждение емкостей для хранения при землетрясении». Следует отметить, что устранение источников повышенных напряжений не гарантирует возвращение элемента в рабочее состояние, так как предыдущая перегрузка могла вызвать необратимое повреждение в элементе, требующее в этом случае ремонта.

Инициированные отказы (ошибочные команды). Люди, например операторы и обслуживающий технический персонал, также являются возможными источниками вторичных отказов, если их действия приводят к выходу элементов из строя. Ошибочные команды представляются в виде элемента, находящегося в нерабочем состоянии из-за неправильного сигнала управления или помех (при этом лишь иногда требуется ремонт для возвращения данного элемента в рабочее состояние). Самопроизвольные сигналы управления или помехи часто не оставляют последствий (повреждений), и в нормальных последующих режимах элементы работают в соответствии с заданными требованиями. Типичными примерами ошибочных команд являются: «напряжение приложено самопроизвольно к обмотке реле», «переключатель случайно не разомкнулся из-за помех», «помехи на входе контрольного прибора в системе безопасности вызвали ложный сигнал на остановку», «оператор не нажал на аварийную кнопку» (ошибочная команда от аварийной кнопки).

Множественный отказ (отказы общего характера) есть событие, при котором несколько элементов выходят из строя по одной и той же причине. К числу таких причин могут быть отнесены следующие:

- конструкторские недоработки оборудования (дефекты, не выявленные на стадии проектирования и приводящие к отказам вследствие взаимной зависимости между электрическими и механическими подсистемами или элементами избыточной системы);
- ошибки эксплуатации и технического обслуживания (неправильная регулировка или калибровка, небрежность оператора, неправильное обращение и т. п.);
- воздействие окружающей среды (влажность, пыль, грязь, температура, вибрация, а также экстремальные режимы нормальной эксплуатации);
- внешние катастрофические воздействия (естественные внешние явления, такие как наводнение, землетрясение, пожар, ураган);
- общий изготовитель (резервируемое оборудование или его компоненты, поставляемые одним и тем же изготовителем, могут иметь общие конструктивные или производственные дефекты. Например, производственные дефекты могут быть вызваны неправильным выбором материала, ошибками в системах монтажа, некачественной пайкой и т. п.);
- общий внешний источник питания (общий источник питания для основного и резервного оборудования, резервируемых подсистем и элементов);
- неправильное функционирование (неверно выбранный комплекс измерительных приборов или неудовлетворительно спланированные меры защиты).

Известен целый ряд примеров множественных отказов: так, некоторые параллельно соединенные пружинные реле выходили из строя одновременно и их отказы были вызваны общей причиной; вследствие неправильного расцепления муфт при техническом обслуживании два клапана оказались

установлены в неправильное положение; из-за разрушения паропровода имели место сразу несколько отказов коммутационного щита. В некоторых случаях общая причина вызывает не полный отказ резервированной системы (одновременный отказ нескольких узлов, т.е. предельный случай), а менее серьезное общее понижение надежности, что приводит к повышению вероятности совместного отказа узлов систем. Такое явление наблюдается в случае исключительно неблагоприятных окружающих условий, когда ухудшение характеристик приводит к отказу резервного узла. Наличие общих неблагоприятных внешних условий приводит к тому, что отказ второго узла зависит от отказа первого и спарен с ним.

Для каждой общей причины необходимо определить все вызываемые ею исходные события. При этом определяют сферу действия каждой общей причины, а также место расположения элементов и время происшествя. Некоторые общие причины имеют лишь ограниченную сферу действия. Например, утечка жидкости может ограничиваться одним помещением, и электрические установки, их элементы в других помещениях не будут повреждены вследствие утечек, если только эти помещения не сообщаются друг с другом.

Отказ считают по сравнению с другим более критичным, если его предпочтительнее рассматривать в первую очередь при разработке вопросов надежности и безопасности. При сравнительной оценке критичности отказов учитывают последствия отказа, вероятность возникновения, возможность обнаружения, локализации и т. д.

Указанные выше свойства технических объектов и промышленная безопасность — взаимосвязаны. Так, при неудовлетворительной надежности объекта вряд ли следует ожидать хороших показателей его безопасности. В то же время перечисленные свойства имеют свои самостоятельные функции. Если при анализе надежности изучается способность объекта выполнять заданные функции (при определенных условиях эксплуатации) в установленных пределах, то при оценке промышленной безопасности выявляют причинно-следственные связи возникновения и развития аварий и других нарушений с всесторонним анализом последствий этих нарушений.

4.2. Количественные характеристики надежности

4.2.1. Критерии и количественные характеристики надежности

Критерием надежности называется признак, по которому можно количественно оценить надежность различных устройств.

К числу наиболее широко применяемых критериев надежности относятся:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени $P(t)$;
- средняя наработка до первого отказа T_{cp} ;
- наработка на отказ t_{cp} ;

- частота отказов $f(t)$ или $a(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- параметр потока отказов $\omega(t)$;
- функция готовности $K_T(t)$;
- коэффициент готовности K_T .

Характеристикой надежности следует называть количественное значение критерия надежности конкретного устройства.

Выбор количественных характеристик надежности зависит от вида объекта.

4.2.1.2. Критерии надежности невосстанавливаемых объектов

Рассмотрим следующую модель работы устройства.

Пусть в работе (на испытании) находится N_0 элементов и работа считается законченной, если все они отказали. Причем вместо отказавших элементов отремонтированные не ставятся. Тогда критериями надежности данных изделий являются:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- частота отказов $f(t)$ или $a(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до первого отказа T_{cp} .

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

Согласно определению:

$$P(t) = P(T > t), \quad (4.2.1)$$

где: T — время работы элемента от его включения до первого отказа;

t — время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$\bar{P}(t) = [N_0 - n(t)] / N_0, \quad (4.2.2)$$

где: N_0 — число элементов в начале работы (испытаний);

$n(t)$ — число отказавших элементов за время t ;

$\bar{P}(t)$ — статистическая оценка вероятности безотказной работы. При большом числе элементов (изделий) N_0 статистическая оценка $\bar{P}(t)$ практически совпадает с вероятностью безотказной работы $P(t)$. На практике иногда более удобной характеристикой является вероятность отказа $Q(t)$.

Вероятностью отказа называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникает хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа являются событиями несовместными и противоположными, поэтому:

$$Q(t) = P(T \leq t), \bar{Q}(t) = n(t) / N_0, Q(t) = 1 - P(t). \quad (4.2.3)$$

Частотой отказов по статистическим данным называется отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих (испытываемых) при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются.

Согласно определению:

$$\bar{f}(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t, \quad (4.2.4)$$

где: $n(\Delta t)$ — число отказавших элементов в интервале времени от $(t - \Delta t) / 2$ до $(t + \Delta t) / 2$.

Частота отказов есть плотность вероятности (или закон распределения) времени работы изделия до первого отказа. Поэтому:

$$P(t) = 1 - Q(t), P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (4.2.5)$$

Интенсивностью отказов по статистическим данным называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

Согласно определению

$$\bar{\lambda}(t) = n(\Delta t) / (N_{cp} \Delta t), \quad (4.2.6)$$

где: $N_{cp} = (N_i + N_{i+1}) / 2$ — среднее число исправно работающих элементов в интервале Δt ;

N_i — число изделий, исправно работающих в начале интервала Δt ;

N_{i+1} — число элементов, исправно работающих в конце интервала Δt .

Вероятностная оценка характеристики $\lambda(t)$ находится из выражения:

$$\lambda(t) = f(t) / P(t). \quad (4.2.7)$$

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью:

$$P(t) = \exp \left(- \int_0^t \lambda(t) dt \right). \quad (4.2.8)$$

Средней наработкой до первого отказа называется математическое ожидание времени работы элемента до отказа.

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

$$M[t] = T_{cp} = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt, \quad (4.2.9)$$

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

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (4.2.10)$$

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

$$\bar{T}_{cp} = \left(\sum_{i=1}^{N_0} t_i \right) / N_0, \quad (4.2.11)$$

где: t_i — время безотказной работы i -го элемента;

N_0 — число исследуемых элементов.

Как видно из формулы (4.2.11), для определения средней наработки до первого отказа необходимо знать моменты выхода из строя всех испытуемых элементов. Поэтому для вычисления средней наработки на отказ 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:

$$\bar{T}_{cp} \approx \left(\sum_{i=1}^m n_i t_{cpi} \right) / N_0, \quad (4.2.12)$$

В выражении (4.2.12) t_{cpi} и m находятся по следующим формулам:

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

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;

$\Delta t = (t_{i-1} - t_1)$ — интервал времени.

Из выражений для оценки количественных характеристик надежности видно, что все характеристики, кроме средней наработки до первого отказа, являются функциями времени. Конкретные выражения для практической оценки количественных характеристик надежности устройств рассмотрены в разделе «Законы распределения отказов».

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых изделий. Они также позволяют оценить **надежность восстанавливаемых изделий до первого отказа**. Наличие нескольких критериев вовсе не означает, что всегда нужно оценивать надежность элементов по всем критериям.

Наиболее полно надежность изделий характеризуется частотой отказов $f(t)$ или $a(t)$. Это объясняется тем, что частота отказов является плотностью распределения, а поэтому несет в себе всю информацию о случайном явлении — времени безотказной работы.

Средняя наработка до первого отказа является достаточно наглядной характеристикой надежности. Однако применение этого критерия для оценки надежности сложной системы ограничено в тех случаях, когда:

- время работы системы гораздо меньше среднего времени безотказной работы;
- закон распределения времени безотказной работы не однопараметрический и для достаточно полной оценки требуются моменты высших порядков;
- система резервированная;
- интенсивность отказов не постоянная;
- время работы отдельных частей сложной системы разное.

Интенсивность отказов — наиболее удобная характеристика надежности простейших элементов, так как она позволяет более просто вычислять количественные характеристики надежности сложной системы.

Наиболее целесообразным критерием надежности сложной системы является вероятность безотказной работы. Это объясняется следующими особенностями вероятности безотказной работы:

- она входит в качестве сомножителя в другие, более общие характеристики системы, например, в эффективность и стоимость;
- характеризует изменение надежности во времени;
- может быть получена сравнительно просто расчетным путем в процессе проектирования системы и оценена в процессе ее испытания.

4.2.1.3. Критерии надежности восстанавливаемых объектов

Рассмотрим следующую модель работы.

Пусть в работе находится N элементов и отказавшие элементы немедленно заменяются исправными (новыми или отремонтированными). Если не учитывать времени, потребного на восстановление системы, то количественными характеристиками надежности могут быть параметр потока отказов $\omega(t)$ и наработка на отказ t_{cp} .

Параметром потока отказов называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к числу испытываемых при условии, что все вышедшие из строя изделия заменяются исправными (новыми или отремонтированными).

Статистическим определением служит выражение:

$$\bar{\omega}(t) = n(\Delta t) / N\Delta t, \quad (4.2.13)$$

где: $n(\Delta t)$ — число отказавших образцов в интервале времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$;

N — число испытываемых элементов;

Δt — интервал времени.

Параметр потока отказов и частота отказов для ординарных потоков с ограниченным последствием связаны интегральным уравнением Вольтера второго рода:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) d\tau. \quad (4.2.14)$$

По известной $f(t)$ можно найти все количественные характеристики надежности невосстанавливаемых изделий. Поэтому (4.2.14) является основным уравнением, связывающим количественные характеристики надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых элементов при мгновенном восстановлении.

Уравнение (4.2.14) можно записать в операторной форме:

$$\omega(s) = \frac{f(s)}{1 - f(s)}, \quad f(s) = \frac{\omega(s)}{1 + \omega(s)}. \quad (4.2.15)$$

Соотношения (4.2.15) позволяют найти одну характеристику через другую, если существуют преобразования Лапласа функций $f(s)$ и $\omega(s)$ и обратные преобразования выражений (4.2.15).

Параметр потока отказов обладает следующими важными свойствами:

1) для любого момента времени, независимо от закона распределения времени безотказной работы, параметр потока отказов больше, чем частота отказов, т. е. $\omega(t) > f(t)$;

2) независимо от вида функций $f(t)$ параметр потока отказов $\omega(t)$ при $t \rightarrow \infty$ стремится к $1/T_{cp}$. Это важное свойство параметра потока отказов означает, что при длительной эксплуатации ремонтируемого изделия поток его отказов, независимо от закона распределения времени безотказной работы, становится стационарным. Однако это вовсе не означает, что интенсивность отказов есть величина постоянная;

3) если $\lambda(t)$ — возрастающая функция времени, то $\lambda(t) > \omega(t) > f(t)$, если $\lambda(t)$ — убывающая функция, то $\omega(t) > \lambda(t) > f(t)$;

4) при $\lambda(t) \neq \text{const}$ параметр потока отказов системы не равен сумме параметров потока отказов элементов, т. е.:

$$\omega_c(t) \neq \sum_{i=1}^N \omega_i(t). \quad (4.2.16)$$

Это свойство параметра потока отказов позволяет утверждать, что при вычислении количественных характеристик надежности сложной системы нельзя суммировать имеющиеся в настоящее время значения интенсивности отказов элементов, полученных по статистическим данным об отказах изделий в условиях эксплуатации, так как указанные величины являются фактически параметрами потока отказов;

5) при $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ параметр потока отказов равен интенсивности отказов $\omega(t) = \lambda(t) = \lambda$.

Из рассмотрения свойств интенсивности и параметра потока отказов видно, что эти характеристики различны.

В настоящее время широко используются статистические данные об отказах, полученные в условиях эксплуатации оборудования. При этом они часто обрабатываются таким образом, что приводимые характеристики надежности являются не интенсивностью отказов, а параметром потока отка-

зов $\omega(t)$. Это вносит ошибки при расчетах надежности. В ряде случаев они могут быть значительными.

Для получения интенсивности отказов элементов из статистических данных об отказах ремонтируемых систем необходимо воспользоваться формулой (4.2.6), для чего необходимо знать предысторию каждого элемента технологической схемы. Это может существенно усложнить методику сбора статистических данных об отказах. Поэтому целесообразно определять $\lambda(t)$ по параметру потока отказов $\omega(t)$. Методика расчета сводится к следующим вычислительным операциям:

- по статистическим данным об отказах элементов ремонтируемых изделий и по формуле (4.2.13) вычисляется параметр потока отказов и строится гистограмма $\omega_i(t)$;
- гистограмма заменяется кривой, которая аппроксимируется уравнением;
- находится преобразование Лапласа $\omega_i(s)$ функции $\omega_i(t)$;
- по известной $\omega_i(s)$ на основании (4.2.15) записывается преобразование Лапласа $f_i(s)$ частоты отказов;
- по известной $f_i(s)$ находится обратное преобразование частоты отказов $f_i(t)$;
- находится аналитическое выражение для интенсивности отказов по формуле:

$$\lambda_i(t) = f_i(t) / \left(1 - \int_0^t f_i(t) dt \right); \quad (4.2.17)$$

- строится график $\lambda_i(t)$.

Если имеется участок, где $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$, то постоянное значение интенсивности отказов принимается для оценки вероятности безотказной работы. При этом считается справедливым экспоненциальный закон надежности.

Приведенная методика не может быть применена, если не удастся найти по $f(s)$ обратное преобразование частоты отказов $f(t)$. В этом случае приходится применять приближенные методы решения интегрального уравнения (4.2.14).

Наработкой на отказ называется среднее значение времени между соседними отказами.

Эта характеристика определяется по статистическим данным об отказах по формуле:

$$\bar{t}_{cp} = \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) / n, \quad (4.2.18)$$

где: t_i — время исправной работы элемента между $(i - 1)$ -м и i -м отказами;

n — число отказов за некоторое время t .

Из формулы (4.2.18) 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:

$$\bar{t}_{cp} = \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} \right) / \sum_{j=1}^N n_j, \quad (4.2.19)$$

где: t_{ij} — время исправной работы j -го образца изделия между $(i - 1)$ -м и i -м отказом;

n_j — число отказов за время t_j -го образца.

Наработка на отказ является достаточно наглядной характеристикой надежности, поэтому она получила широкое распространение на практике.

Параметр потока отказов и наработка на отказ характеризуют надежность восстанавливаемого изделия и не учитывают времени, необходимого на его восстановление. Поэтому они не характеризуют готовности устройства к выполнению своих функций в нужное время. Для этой цели вводятся такие критерии, как коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя.

Коэффициентом готовности называется отношение времени исправной работы к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев устройства, взятых за один и тот же календарный срок. Эта характеристика по статистическим данным определяется:

$$\bar{K}_r = t_p / (t_p + t_n), \quad (4.2.20)$$

где: t_p — суммарное время исправной работы изделия;

t_n — суммарное время вынужденного простоя.

Времена t_p и t_n вычисляются по формулам:

$$t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad t_n = \sum_{i=1}^n t_{ni} \quad (4.2.21)$$

где: t_{pi} — время работы изделия между $(i - 1)$ -м и i -м отказом;

t_{ni} — время вынужденного простоя после i -го отказа;

n — число отказов (ремонт) изделия.

Для перехода к вероятностной трактовке величины t_p и t_n заменяются математическими ожиданиями времени между соседними отказами и времени восстановления соответственно. Тогда:

$$K_r = t_{cp} / (t_{cp} + t_{\theta}), \quad (4.2.22)$$

где: t_{cp} — наработка на отказ;

t_{θ} — среднее время восстановления.

Коэффициентом вынужденного простоя называется отношение времени вынужденного простоя к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев изделия, взятых за один и тот же календарный срок.

Согласно определению:

$$\overline{K}_n = t_p / (t_p + t_n), \quad (4.2.23)$$

или, переходя к средним величинам:

$$K_n = t_e / (t_{cp} + t_e). \quad (4.2.24)$$

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собой зависимостью:

$$K_n = 1 - K_z. \quad (4.2.25)$$

При анализе надежности восстанавливаемых систем обычно коэффициент готовности вычисляют по формуле:

$$K_z = T_{cp} / (T_{cp} + t_e). \quad (4.2.26)$$

Формула (4.2.26) верна только в том случае, если поток отказов простейший, и тогда $t_{cp} = T_{cp}$.

Часто коэффициент готовности, вычисленный по формуле (4.2.26), отождествляют с вероятностью того, что в любой момент времени восстанавливаемая система исправна. На самом деле указанные характеристики неравноценны и могут быть отождествлены при определенных допущениях.

Действительно, вероятность возникновения отказа ремонтируемой системы в начале эксплуатации мала. С ростом времени t эта вероятность возрастает. Это означает, что вероятность застать систему в исправном состоянии в начале эксплуатации будет выше, чем после истечения некоторого времени. Между тем на основании формулы (4.2.26) коэффициент готовности не зависит от времени работы.

Для выяснения физического смысла коэффициента готовности K_z запишем формулу для вероятности застать систему в исправном состоянии. При этом рассмотрим наиболее простой случай, когда интенсивность отказов λ и интенсивность восстановления μ есть величины постоянные.

Предполагая, что при $t = 0$ система находится в исправном состоянии ($P(0) = 1$), вероятность застать систему в исправном состоянии определяется из выражений:

$$P_T(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t]; \quad (4.2.27)$$

$$P_z(t) = K_z + (1 - K_z) \exp(-t / K_{zt_e}),$$

где $\lambda = 1 / T_{cp}$; $\mu = 1 / t_e$; $K_z = T_{cp} / (T_{cp} + t_e)$.

Это выражение устанавливает зависимость между коэффициентом готовности системы и вероятностью застать ее в исправном состоянии в любой момент времени t .

Из (4.2.27) видно, что $P_z(t) \rightarrow K_z$ при $t \rightarrow \infty$, т. е. практически коэффициент готовности имеет смысл вероятности застать изделие в исправном состоянии при установившемся процессе эксплуатации.

В некоторых случаях критериями надежности восстанавливаемых систем могут быть критерии невосстанавливаемых систем, например: **вероятность**

безотказной работы, частота отказов, средняя наработка до первого отказа, интенсивность отказов. Такая необходимость возникает:

- когда имеет смысл оценивать надежность восстанавливаемой системы до первого отказа;
- в случае, когда применяется резервирование с восстановлением отказавших резервных устройств в процессе работы системы, причем отказ всей резервированной системы не допускается.

4.3. Теоретические законы распределения отказов

Отказы в системах возникают под воздействием разнообразных факторов. Поскольку каждый фактор в свою очередь зависит от многих причин, то отказы элементов, входящих в состав системы, относятся, как правило, к случайным событиям, а время работы до возникновения отказов — к случайным величинам. В инженерной практике возможны и не случайные (детерминированные) отказы (отказы, возникновение которых происходит в определенный момент времени, т.е. в момент возникновения причины, так как существует однозначная и определенная связь между причиной отказа и моментом его возникновения). Например, если в цепи аппаратов ошибочно поставлен элемент, не способный работать при пиковой нагрузке, то всякий раз когда возникает эта нагрузка, он обязательно перейдет в отказовое состояние. Такие отказы выявляются и устраняются в процессе проверки технической документации и испытаний.

При анализе надежности объектом исследования являются случайные события и величины. В качестве теоретических распределений наработки до отказа могут быть использованы любые применяемые в теории вероятностей непрерывные распределения. В принципе можно взять любую кривую, площадь под которой равна единице, и использовать ее в качестве кривой распределения случайной величины. Поэтому, прежде чем приступить к инженерным методам расчета надежности и испытаний на надежность, следует рассмотреть закономерности, которым они подчиняются.

4.3.1. Случайное событие

Случайное событие — событие (факт, явление), которое в результате опыта может произойти или не произойти. Случайные события (отказы, восстановления, заявки на обслуживание и др.) образуют случайные потоки и случайные процессы. **Поток событий** — последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то отрезки времени. Например, отказы восстанавливаемого устройства образуют поток событий (поток отказов). Под действием потока отказов и потока восстановлений техническое устройство может находиться в различных состояниях (полного отказа, частичного отказа, работоспособное). Переход изделия из одного состояния в другое представляет собой **случайный процесс**.

4.3.2. Случайная величина

Случайная величина — величина, которая в результате опыта может принимать то или иное значение, причем неизвестно заранее какое именно. Случайная величина может быть **дискретной** (число отказов за время t , число отказавших элементов при наработке заданного объема и т. д.), либо **непрерывной** (время наработки элемента до отказа, время восстановления работоспособности).

Закон распределения случайной величины — соотношение, устанавливающее связь между значениями случайной величины и их вероятностями. Он может быть представлен формулой, таблицей, многоугольником распределений.

Для характеристики случайной величины (непрерывной и дискретной) используется вероятность того, что случайная величина X меньше некоторой текущей переменной x .

Функция распределения случайной величины X (интегральный закон распределения) — функция вида $F(x) = p(X < x)$.

Плотность распределения непрерывной случайной величины X (дифференциальный закон распределения) — производная от функции распределения:

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x); \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1; \quad \int_{-\infty}^X f(x) dx = F(X). \quad (4.3.1)$$

В теории надежности за случайную величину обычно принимают время работы изделия (время до возникновения отказа). В этом случае функция плотности распределения $f(t)$ будет служить полной характеристикой рассеивания сроков службы элементов (рис. 4.3.1). Вид этой функции зависит от закономерностей процесса потери элементом работоспособности.

Кривая распределения $f(t)$ — частота отказов — дает возможность подсчитать средний срок службы элемента T_{cp} (математическое ожидание $M[t]$), рассеивание (дисперсию D) этих сроков службы относительно центра группирования и другие числовые параметры случайной величины T .

Если взять некоторый период времени работы элемента t , то площадь $F(t)$ кривой распределения $f(t)$ будет характеризовать вероятность отказа (выхода из строя) элемента за этот период времени (рис. 4.3.1, б). Поэтому левая ветвь кривой распределения $f(t)$, относящаяся к области малой вероятности отказов, используется обычно для характеристики безотказности работы изделия, а вся кривая $f(t)$ и ее параметры необходимы для оценки его долговечности.

Ординаты интегральной функции распределения $F(t)$ (рис. 4.3.1, в) характеризуют вероятность отказа детали до данного момента времени:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt.$$

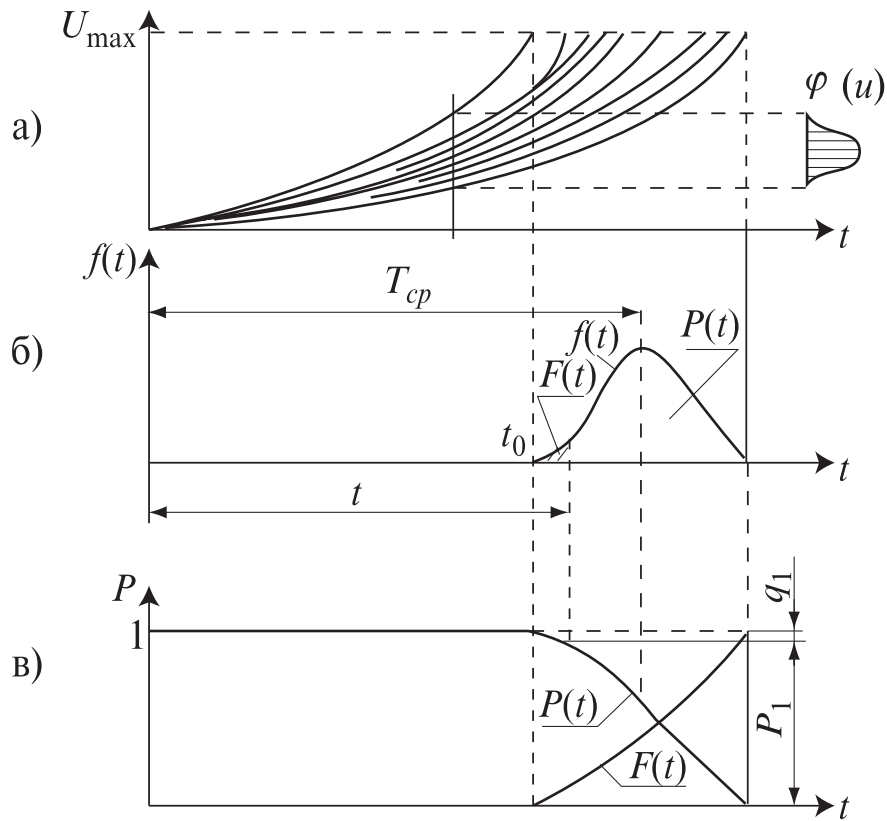


Рис. 4.3.1. Кривые распределения случайной величины при износных (постепенных) отказах:

а — реализация функции износа $j(U)$;

б — плотность распределения сроков службы $f(t)$;

в — интегральная функция распределения $F(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$

Во многих случаях нет необходимости пользоваться функциями $F(t)$ или $f(t)$, достаточно знать числовые характеристики этих кривых.

Основной характеристикой положения кривой $f(t)$ является математическое ожидание $M[t]$, которое в нашем случае является средним сроком службы T_{cp} (наработкой на отказ):

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt.$$

Основной характеристикой рассеивания случайной величины является дисперсия D или среднее квадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{D}$:

$$D(t) = \int_0^{\infty} (T_{cp} - t)^2 f(t) dt.$$

Чем больше значение D (или соответственно σ), тем больше рассеивание сроков службы относительно их среднего значения $M[t]$.

Для оценки надежности работы элемента, принимая за основную случайную величину время до возникновения отказа, можно определить и вероятность безотказной работы $P(t)$ в пределах заданного периода t . Для этого воспользуемся значением интегральной функции:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt.$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ относится к событию, противоположному появлению отказа $F(t)$. Поэтому $F(t) + P(t) = 1$ или $P(t) = 1 - F(t)$. Следовательно, $P(t)$ определяется (4.2.5).

В этом случае:

- функция распределения отказа $F(t) = P(t < t_{зад}) = Q(t)$;
- плотность распределения $f(t) = dQ(t) / dt$;
- вероятность безотказности изделия за время t : $P(t) = 1 - Q(t)$.

Интенсивность отказов (условная плотность вероятности отказов) — отношение $f(t)$ к $P(t)$, см. (4.2.7):

$$\lambda(t) = f(t) / P(t).$$

Типичная функция интенсивности отказов изображена на рис. 4.3.2.

Участок убывающей интенсивности отказов ($t_0 - t_1$) иногда называют **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**. Этот период начинается сразу же после периода приработки и заканчивается непосредственно перед **периодом износовых отказов**.

Период износовых отказов начинается тогда, когда элемент (устройство) выработал свой ресурс, вследствие чего число отказов в этом периоде начинает возрастать.

Отказы, появляющиеся в периоде нормальной эксплуатации, называют **внезапными**, так как они появляются в случайные моменты времени, или, другими словами, непредсказуемо.

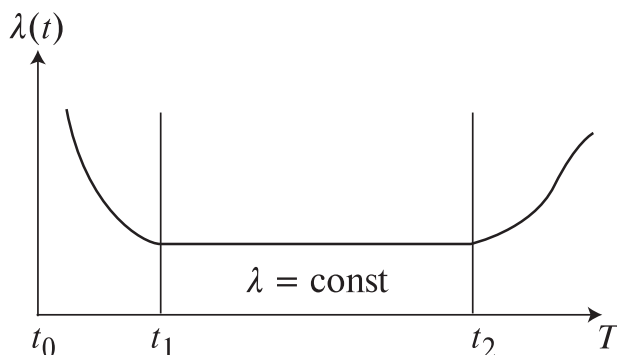


Рис. 4.3.2. Типичная функция интенсивности отказов

4.3.3. Основные законы распределения, используемые в теории надежности

В теории надежности наибольшее распространение получили следующие законы распределения случайных величин $f(t)$:

- для дискретных случайных величин — биномиальный закон; закон Пуассона;

— для непрерывных случайных величин — экспоненциальный закон; нормальный закон; гамма-распределение; закон Вейбулла; χ^2 — распределение; логарифмически-нормальное распределение.

Биномиальный закон распределения числа n появления события A в m независимых опытах (испытаниях). Если вероятность появления события A в одном испытании равна p , вероятность не появления события A равна $q = 1 - p$; число независимых испытаний равно m , то вероятность появления n событий в испытаниях будет:

$$P_m^n = C_m^n p^n (1 - p)^{m-n}, \quad (4.3.2)$$

где: C_m^n — число сочетаний из m по n .

Свойства распределения следующие:

- 1) число событий n — целое положительное число;
- 2) математическое ожидание числа событий равно mp ;
- 3) среднеквадратическое отклонение числа событий:

$$\sigma = \sqrt{mp(1 - p)}.$$

При увеличении числа испытаний биномиальное распределение приближается к нормальному со средним значением n/m и дисперсией $p(1 - p) / m$.

Закон Пуассона — распределение чисел случайного события n_i за время τ . Вероятность возникновения случайного события n раз за время τ :

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \exp(-\lambda\tau), \quad (4.3.3)$$

где: λ — интенсивность случайного события.

Свойства распределения следующие:

- 1) математическое ожидание числа событий за время τ равно $\lambda\tau$;
- 2) среднеквадратическое отклонение числа событий:

$$\sigma = \sqrt{\lambda\tau}.$$

Характерный признак распределения Пуассона — равенство математического ожидания и дисперсии. Это свойство используется для проверки степени соответствия исследуемого (опытного) распределения с распределением Пуассона.

Распределение Пуассона получается из биномиального распределения, если число испытаний m неограниченно возрастает, а математическое ожидание числа событий $a = \lambda\tau$ остается постоянным.

Тогда вероятность P_m^n биномиального распределения при каждом n , равном 0, 1, 2, ..., стремится к пределу:

$$P_m^n \rightarrow \frac{(a)^n}{n!} \exp(-a).$$

Закон Пуассона используется тогда, когда необходимо определить вероятность того, что в изделии за заданное время произойдет один, два, три и т. д. отказов.

Экспоненциальный (показательный) закон распределения случайной величины X (рис. 4.3.3, а) записывается в общем случае так:

$$P(x) = \exp(-\lambda x),$$

где: $P(x)$ — вероятность того, что случайная величина X имеет значение больше x ; значения e^{-x} даются в приложении 1.

В частном случае, когда за случайную величину принимается время работы объекта t , вероятность того, что изделие на протяжении времени t будет находиться в работоспособном состоянии, равна $\exp(-\lambda t)$:

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (4.3.4)$$

где: λ — интенсивность отказов объекта для экспоненциального распределения (она постоянна), т. е. $\lambda = \text{const}$.

Выражение (4.3.4) можно получить непосредственно из (4.3.3), если число отказов n принять равным 0.

Вероятность отказа за время t из (4.3.4):

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (4.3.5)$$

Плотность вероятности отказов:

$$f(t) = \partial Q / \partial t = \lambda \exp(-\lambda t). \quad (4.3.6)$$

Среднее время работы до возникновения отказа:

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt = 1 / \lambda. \quad (4.3.7)$$

Дисперсия времени работы до возникновения отказа:

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T_1)^2 f(t) dt = 1 / \lambda^2. \quad (4.3.8)$$

Среднеквадратическое время работы:

$$\sigma(t) = T_1. \quad (4.3.9)$$

Равенство среднеквадратического отклонения среднему времени работы — характерный признак экспоненциального распределения.

Статистические материалы об отказах элементов свидетельствуют о том, что в основном время их работы подчиняется экспоненциальному закону распределения. Условием возникновения экспоненциального закона распределения времени до отказа служит постоянство интенсивности отказов, что характерно для внезапных отказов на интервале времени, когда период приработки объекта закончился, а период износа и старения еще не начался, т. е. для нормальных условий эксплуатации. Постоянной становится интенсивность отказов сложных объектов, если вызываются они отказами большего числа комплектующих элементов.

Время возникновения первичных отказов может быть расположено на оси времени так, что суммарный поток отказов сложного изделия становится близким к простейшему, т. е. с постоянной интенсивностью отказов.

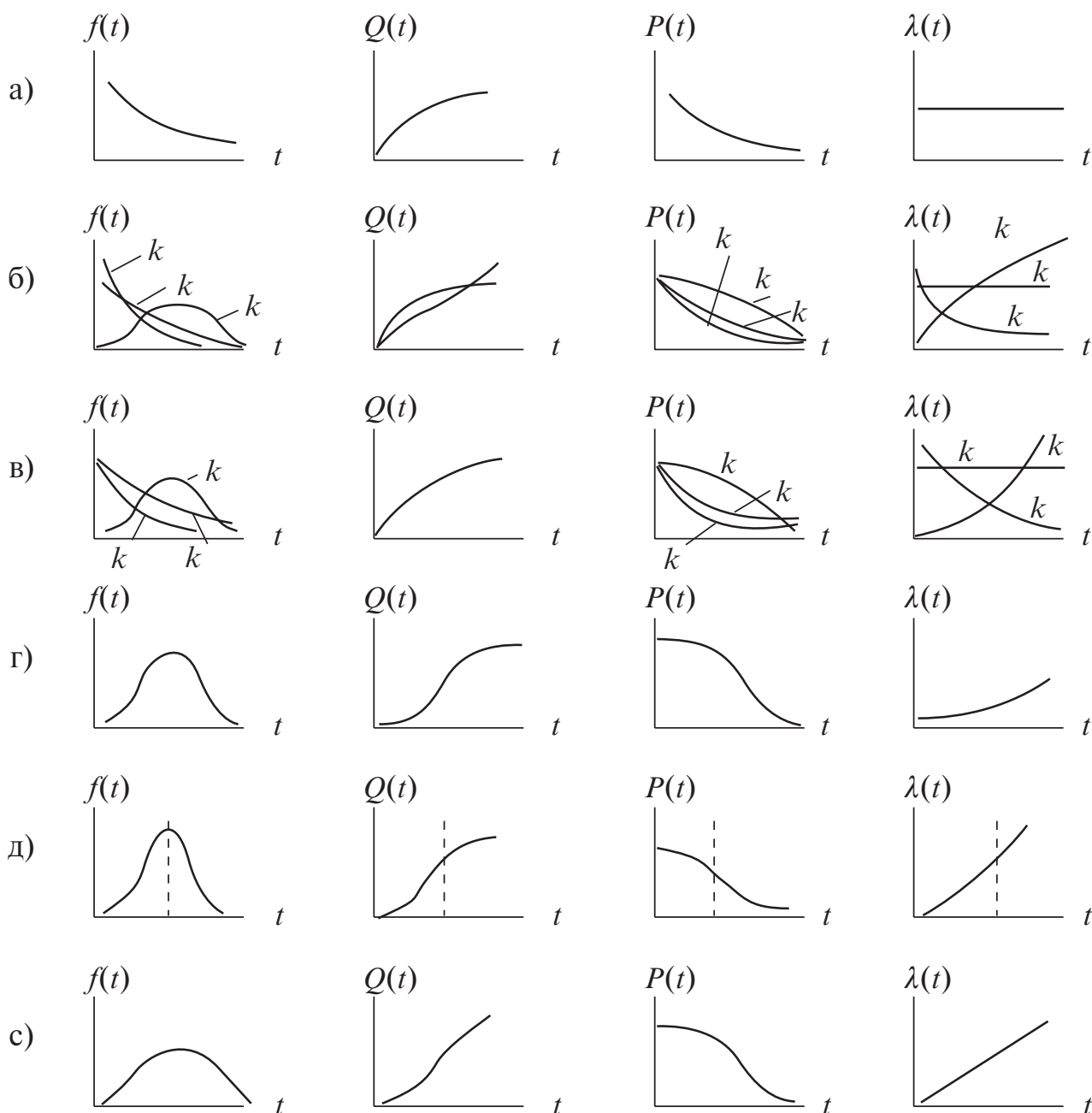


Рис. 4.3.3. Распределения:

а — экспоненциальное; б — γ -распределение; в — Вейбулла;
г — нормальное; д — усеченное нормальное; е — Рэлея

Этими обстоятельствами, а также тем, что предположение об экспоненциальном распределении существенно упрощает расчеты надежности, объясняется широкое применение экспоненциального закона в инженерной практике.

Гамма-распределение случайной величины (рис. 4.3.3, б). Если отказ устройства возникает тогда, когда произойдет не менее k отказов его элементов, а отказы элементов подчинены экспоненциальному закону с параметрами λ_0 , плотность вероятности отказа устройства:

$$f(t) = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda_0 t), \quad (4.3.9)$$

где: λ_0 — исходная интенсивность отказов элементов устройства, отказ которого вызывается отказом k элементов.

Этому распределению подчиняется время работы резервированных устройств. Равенство (4.3.9) получается из (4.3.3).

Вероятность k и более отказов, т. е. вероятность отказа данного устройства:

$$P(n \geq k) = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} \exp(-\lambda_0 t). \quad (4.3.10)$$

Плотность вероятности отказа устройства за время t :

$$f(t) = \frac{d}{dt} \left[1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} \exp(-\lambda_0 t) \right] = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda_0 t). \quad (4.3.11)$$

Среднее время работы устройства до отказа:

$$T_1 = k T_0 = k / \lambda_0. \quad (4.3.12)$$

Интенсивность отказов устройства:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0}{(k-1)!} \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{\sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{i!} (\lambda_0 t)^i}. \quad (4.3.13)$$

Вероятность безотказного состояния устройства:

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{i!} (\lambda_0 t)^i. \quad (4.3.14)$$

При $k = 1$ γ -распределение совпадает с экспоненциальным распределением.

При увеличении k γ -распределение будет приближаться к симметричному распределению, а интенсивность отказов будет иметь все более выраженный характер возрастающей функции времени.

Распределение Вейбулла. Для случая, когда поток отказов не стационарный, т. е. плотность потока изменяется с течением времени, функция распределения времени до отказа приобретает вид, показанный на рис. 4.3.3, в.

Плотность вероятности отказов этого распределения:

$$f(t) = \lambda \alpha t^{\alpha-1} \exp(-\lambda_0 t^\alpha). \quad (4.3.15)$$

Вероятность отсутствия отказа за время t :

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t^\alpha). \quad (4.3.16)$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1}. \quad (4.3.17)$$

В (4.3.15)—(4.3.17) α и λ_0 — параметры закона распределения. Параметр λ_0 определяет масштаб, при его изменении кривая распределения сжимается или растягивается. При $\alpha = 1$ функция распределения Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением; при $\alpha < 1$ интенсивность отказов будет монотонно убывающей функцией; при $\alpha > 1$ — монотонно возрастающей. Это обстоятельство дает возможность подбирать для опытных данных наиболее подходящие параметры α и λ_0 , с тем чтобы уравнение функции распределения наилучшим образом совпадало с опытными данными. Распределение Вейбулла имеет место для отказов, возникающих по причине усталости тела детали или поверхностных слоев (подшипники, зубчатые передачи). Этот случай связан с развитием усталостной трещины в зоне местной концентрации напряжений, технологического дефекта или начального повреждения. Период времени до зарождения микротрещины характеризуется признаками внезапного отказа, а процесс разрушения — признаками износового отказа.

Этот закон применим для отказов устройства, состоящего из последовательно соединенных дублированных элементов и других подобных случаев.

Это распределение иногда используется для описания надежности подшипников качения ($\alpha = 1,4—1,7$).

Средняя наработка до первого отказа определится из следующего выражения:

$$T = \frac{\Gamma(1/\alpha + 1)}{\lambda_0^{1/\alpha}}. \quad (4.3.18)$$

Значения Γ (гамма-функции) табулированы (приложении 2).

Нормальное распределение (рис. 4.3.3, г) случайной величины X возникает всякий раз, когда X зависит от большого числа однородных по своему влиянию случайных факторов, причем влияние каждого из этих факторов по сравнению с совокупностью всех остальных незначительно. Это условие характерно для времени возникновения отказа, вызванного старением, т. е. этот закон используется для оценки надежности изделий при наличии постепенных (износных) отказов.

Плотность вероятности отказов:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(t-T)^2 / 2\sigma^2\right], \quad (4.3.19)$$

где: T — средняя наработка до отказа;

σ — среднее квадратическое (стандартное) отклонение времени безотказной работы.

Вероятность отказа время t :

$$F(t) = \int_{-\infty}^0 f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-(t-T)^2 / 2\sigma^2\right]. \quad (4.3.20)$$

Значение функции распределения определяется формулой:

$$F(t) = 0,5 + \Phi(u) = Q(t); u = (t - T) / \sigma. \quad (4.3.21)$$

Вероятность отсутствия отказа за время t :

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - [0,5 + \Phi(u)] = 0,5 - \Phi(u). \quad (4.3.22)$$

Значения $F(t)$ табулированы (приложение 3).

График $\lambda(t)$ показан на рис. 4.3.3, г. Интенсивность отказов монотонно возрастает и после T начинает приближаться к асимптоте:

$$y = (t - T) / \sigma. \quad (4.3.23)$$

Монотонное возрастание интенсивности отказов с течением времени — характерный признак нормального распределения. Нормальное распределение существенно отличается от экспоненциального. Началом отсчета времени t в (4.3.20) служит начало эксплуатации объекта, т. е. момент, когда начинается процесс износа и старения, а началом отсчета в (4.3.4) — момент времени, когда установлено, что изделие исправно (этот момент может быть расположен в любой точке на оси времени).

Усеченное нормальное распределение (рис. 4.3.3, д). Так как при нормальном распределении случайная величина может принимать любые значения от $-\infty$ до $+\infty$, а время безотказной работы может быть только положительным, следует рассматривать усеченное нормальное распределение с плотностью вероятности отказов:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(t - T_1)^2 / 2\sigma^2\right]. \quad (4.3.24)$$

Нормирующий множитель c определяется из выражения:

$$c \int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (4.3.25)$$

и равен:

$$c = 1 / F(T_1 / \sigma) = 1 / [0,5 + \Phi_0(T_1 / \sigma)], \quad (4.3.26)$$

где:
$$F(T_1 / \sigma) = 1 / 2\pi \int_{-\infty}^{T_1 / \sigma} \exp(-x^2 / 2) dx \quad (4.3.27)$$

табулированная (приложение 4) интегральная функция нормального распределения;

$$\Phi_0(T_1 / \sigma) = 1 / 2\pi \int_{-\infty}^{T_1 / \sigma} (-x^2 / 2) dx \quad (4.3.28)$$

нормированная функция Лапласа.

Тогда (4.3.24) запишется следующим образом:

$$f(t) = \frac{1}{F(T_1 / \sigma)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(t - T_1)^2 / 2\sigma^2\right]. \quad (4.3.29)$$

Средняя наработка до отказа в усеченном распределении и параметр T_1 неусеченного нормального распределения связаны зависимостью:

$$T = T_1 + f(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}F(T_1 / \sigma)} \exp(-T_1^2 / 2\sigma^2). \quad (4.3.30)$$

При $T / \sigma \geq 2$, что имеет место в абсолютном большинстве случаев при оценке надежности устройств с нормально распределенными отказами, коэффициент c мало отличается от единицы и усеченное нормальное распределение достаточно точно аппроксимируется обычным нормальным законом.

Вероятность безотказной работы определяется из выражения:

$$P(t) = \frac{F[(T_1 - t) / \sigma]}{F(T_1 / \sigma)}. \quad (4.3.31)$$

Интенсивность отказов находится из:

$$\lambda(t) = \frac{\exp[-(t - T_1)^2 / 2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi}F((T_1 - t) / \sigma)}. \quad (4.3.32)$$

Распределение Рэлея (рис. 4.3.3, е) — непрерывное распределение вероятностей с плотностью:

$$p(x) = x / \sigma^2 \exp(-x^2 / 2\sigma^2) \text{ при } x > 0;$$

$$p(x) = 0 \text{ при } x \leq 0,$$

зависящей от масштабного параметра $\sigma > 0$. Распределение имеет положительную асимметрию, его единственная мода находится в точке $x = \sigma$. Все моменты распределения Рэлея конечны.

Также как и распределение Вейбулла или γ -распределение, распределение Рэлея пригодно для описания поведения изнашивающихся или стареющих изделий.

Частота отказов (функция плотности распределения вероятности отказов) определяется:

$$f(t) = t / \sigma^2 \exp(-t^2 / 2\sigma^2). \quad (4.3.33)$$

Вероятность безотказной работы вычисляется из выражения:

$$P(t) = \exp(-t^2 / 2\sigma^2). \quad (4.3.34)$$

Интенсивность отказов находится из:

$$\lambda(t) = t / \sigma^2. \quad (4.3.35)$$

Средняя наработка до первого отказа составит:

$$T = \sqrt{\pi / 2} \cdot \sigma. \quad (4.3.36)$$

4.3.4. О выборе закона распределения отказов при расчете надежности

Определение закона распределения отказов имеет большое значение при исследованиях и оценках надежности. Определение $P(t)$ по одной и той же исходной информации о T , но при различных предположениях о законе распределения может привести к существенно отличающимся результатам.

Закон распределения отказов можно определить по экспериментальным данным, но для этого необходимо проведение большого числа опытов в идентичных условиях. Практически эти условия, как правило, трудно обеспечить. Кроме того, такое решение содержит черты пассивной регистрации событий.

Вместе с тем во многих случаях за время эксплуатации успевает отказать лишь незначительная доля первоначально имевшихся объектов. Полученным статистическим данным соответствует начальная (левая) часть экспериментального распределения.

Более рационально — изучение условий, физических процессов при которых возникает то или другое распределение. При этом составляются модели возникновения отказов и соответствующие им законы распределения времени до появления отказа, что позволяет делать обоснованные предположения о законе распределения.

Опытные данные должны служить средством проверки обоснованности прогноза, а не единственным источником данных о законе распределения. Такой подход необходим для оценки надежности новых изделий, для которых статистический материал весьма ограничен.

4.4. Резервирование

Резервирование — метод повышения надежности объекта введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций. В этом случае отказ наступает только после отказа основного элемента и всех резервных элементов.

Систему можно представить из ряда ступеней, выполняющих отдельные функции. Задача резервирования состоит в нахождении такого числа резервных образцов оборудования на каждой ступени, которое будет обеспечивать заданный уровень надежности системы при наименьшей стоимости.

Выбор наилучшего варианта зависит главным образом от того увеличения надежности, которое можно достичь при заданных расходах.

Основной элемент — элемент основной физической структуры объекта, минимально необходимой для нормального выполнения объектом его задач.

Резервный элемент — элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

4.4.1. Виды резервирования

Структурное (элементное) резервирование — метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта. Обеспечивается подключением к основной аппаратуре резервной таким образом, чтобы при отказе основной аппаратуры резервная продолжала выполнять ее функции.

Резервирование функциональное — метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных и наряду с ними.

Временное резервирование — метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для выполнения задач. Другими словами, временное резервирование — такое планирование работы системы, при котором создается резерв рабочего времени для выполнения заданных функций. Резервное время может быть использовано для повторения операции, либо для устранения неисправности объекта.

Информационное резервирование — метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения задач.

Нагрузочное резервирование — метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности его элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных.

С позиций расчета и обеспечения надежности технических систем необходимо рассматривать структурное резервирование.

4.4.2. Способы структурного резервирования

По способу подключения резервных элементов и устройств различают следующие способы резервирования (рис. 4.4.1).

Резервирование раздельное (поэлементное) с постоянным включением резервных элементов (рис. 4.4.2).

Такое резервирование возможно тогда, когда подключение резервного элемента несущественно изменяет рабочий режим устройства. Достоинство его — постоянная готовность резервного элемента, отсутствие затраты времени на переключение. Недостаток — резервный элемент расходует свой ресурс так же, как основной элемент.

Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента одним резервным элементом (рис. 4.4.3). Это такой способ резервирования, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

В этом случае резервный элемент находится в разной степени готовности к замене основного элемента. Достоинство этого способа в том, что

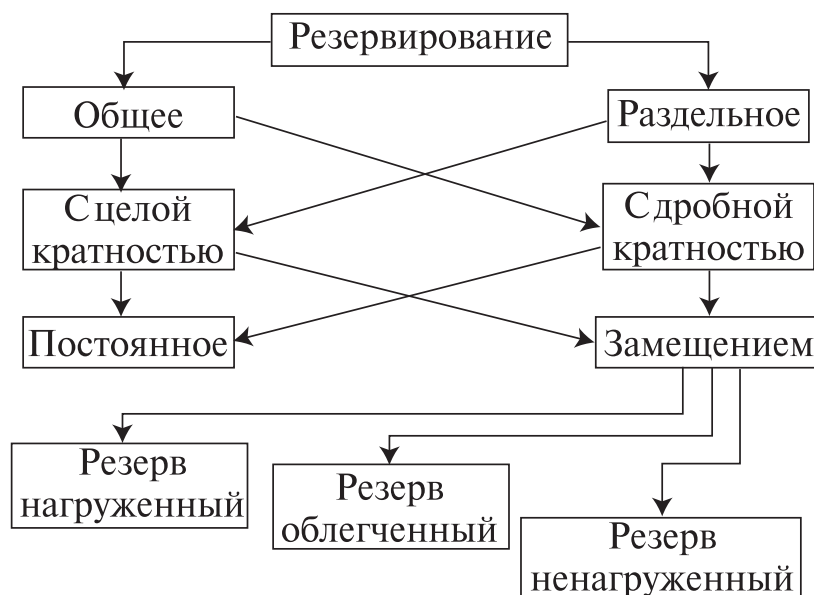


Рис. 4.4.1. Способы структурного резервирования

резервный элемент сохраняет свой рабочий ресурс, либо может быть использован для выполнения самостоятельной задачи. Рабочий режим основного устройства не искажается. Недостаток способа в том, что необходимость затрачивать время на подключение резервного элемента. Резервных элементов может быть меньше, чем основных.

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, так как 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.

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

- нагруженном резерве;
- облегченном резерве;
- ненагруженном резерве.

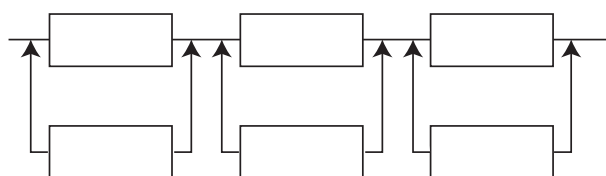


Рис. 4.4.2. Резервирование раздельное с постоянным включением резервных элементов

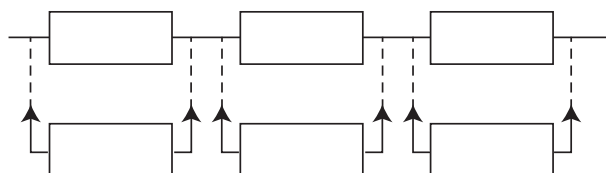


Рис. 4.4.3. Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента

Нагруженный резерв — резервный элемент, находящийся в том же режиме, что и основной.

Облегченный резерв — резервный элемент, находящийся в менее нагруженном режиме, чем основной.

Ненагруженный резерв — резервный элемент, практически не несущий нагрузок.

Резервирование общее с постоянным подключением, либо с замещением (рис. 4.4.4). В этом случае резервируется объект в целом, а в качестве резервного — используется аналогичное сложное устройство. Этот способ менее экономичен, чем раздельное резервирование. При отказе, например, первого основного элемента возникает необходимость подключать всю технологическую резервную цепочку.

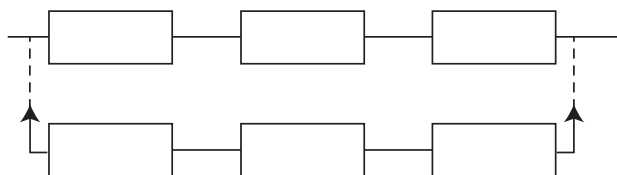


Рис. 4.4.4. Резервирование общее

При отказе, например, первого основного элемента возникает необходимость подключать всю технологическую резервную цепочку.

Резервирование мажоритарное («голосование» n из m элементов) (рис. 4.4.5). Этот способ основан на применении дополнительного элемента — его называют **мажоритарный**, или **логический**, или **кворум-элемент**. Он позволяет вести сравнение сигналов, поступающих от элементов, выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают, тогда они передаются на выход устройства. На рис. 4.4.5 изображено резервирование по принципу голосования «два из трех», т. е. любые два совпадающих результата из трех считаются истинными и проходят на выход устройства. Можно применять соотношения три из пяти и др. Главное достоинство этого способа — обеспечение повышения надежности при любых видах отказов работающих элементов. Любой вид одиночного отказа элемента не окажет влияния на выходной результат.

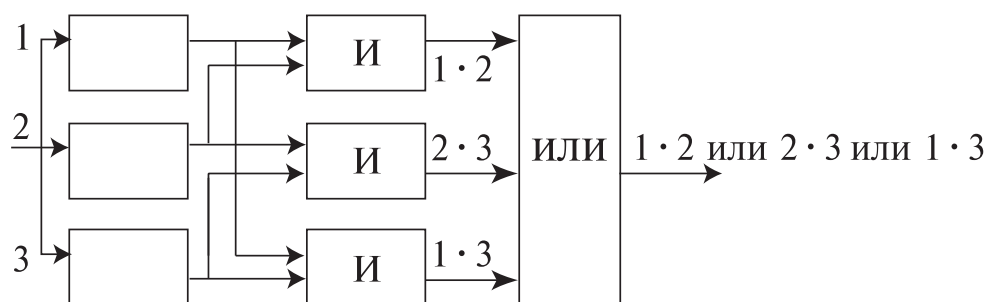


Рис. 4.4.5. Резервирование мажоритарное

4.5. Основы расчета надежности технических систем по надежности их элементов

4.5.1. Целевое назначение и классификация методов расчета

Расчеты надежности — расчеты, предназначенные для определения количественных показателей надежности. Они проводятся на различных этапах разработки, создания и эксплуатации объектов.

На этапе проектирования расчет надежности производится с целью прогнозирования (предсказания) ожидаемой надежности проектируемой системы. Такое прогнозирование необходимо для обоснования предполагаемого проекта, а также для решения организационно-технических вопросов:

- выбора оптимального варианта структуры;
- способа резервирования;
- глубины и методов контроля;
- количества запасных элементов;
- периодичности профилактики.

На этапе испытаний и эксплуатации расчеты надежности проводятся для оценки количественных показателей надежности. Такие расчеты носят, как правило, характер констатации. Результаты расчетов в этом случае показывают, какой надежностью обладали объекты, прошедшие испытания или используемые в некоторых условиях эксплуатации. На основании этих расчетов разрабатываются меры по повышению надежности, определяются слабые места объекта, даются оценки его надежности и влияния на нее отдельных факторов.

Многочисленные цели расчетов привели к большому их разнообразию. На рис. 4.5.1 изображены основные виды расчетов.

Элементный расчет — определение показателей надежности объекта, обусловленных надежностью его комплектующих частей (элементов). В результате такого расчета оценивается техническое состояние объекта (вероятность того, что объект будет находиться в работоспособном состоянии, средняя наработка на отказ и т. п.).

Расчет функциональной надежности — определение показателей надежности выполнения заданных функций (например, вероятность того, что система очистки газа будет работать заданное время, в заданных режимах эксплуатации, с сохранением всех необходимых параметров по показателям очистки). Поскольку такие показатели зависят от ряда действующих факторов, то, как правило, расчет функциональной надежности более сложен, чем элементный расчет.

Выбирая на рис 4.5.1 варианты перемещений по пути, указанному стрелками, каждый раз получаем новый вид (случай) расчета.

Самый простой расчет — расчет, характеристики которого представлены на рис. 4.5.1 слева: элементный расчет аппаратурной надежности простых изделий, нерезервированных, без учета восстановлений работоспособности

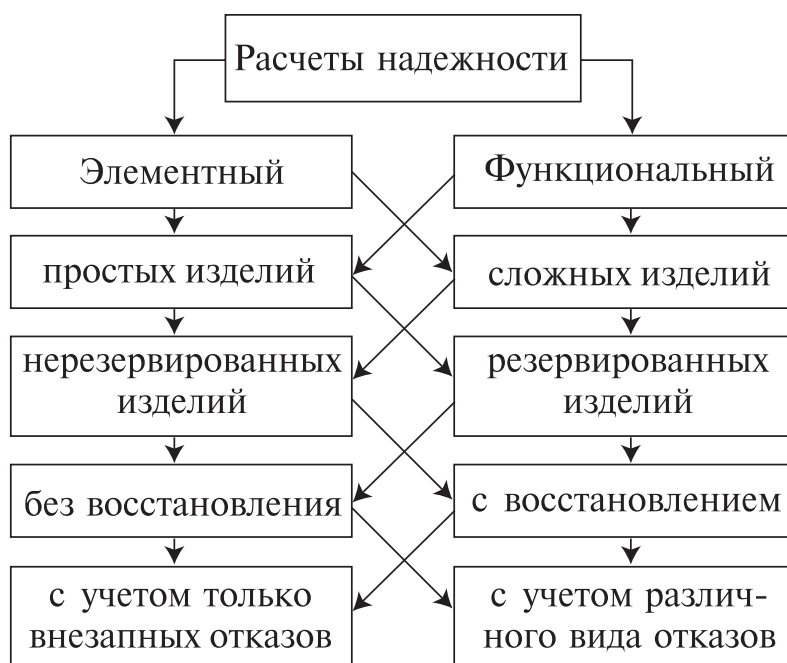


Рис. 4.5.1. Классификация расчетов надежности

при условии, что время работы до отказа подчинено экспоненциальному распределению.

Самый сложный расчет — расчет, характеристики которого представлены на рис. 4.5.1 справа: функциональной надежности сложных резервированных систем с учетом восстановления их работоспособности и различных законов распределения времени работы и времени восстановления.

Выбор того или иного вида расчета надежности определяется заданием на расчет надежности. На основании задания и последующего изучения работы устройства (по его техническому описанию) составляется алгоритм расчета надежности, т. е. последовательность этапов расчета и расчетные формулы.

4.5.2. Последовательность расчета систем

Последовательность расчета системы представлена на рис. 4.5.2. Рассмотрим основные ее этапы.

Прежде всего следует четко сформулировать задание на расчет надежности. В нем должны быть указаны: 1) назначение системы ее состав и основные сведения о функционировании; 2) показатели надежности и признаки отказов, целевое назначение расчетов; 3) условия, в которых работает (или будет работать) система; 4) требования к точности и достоверности расчетов, к полноте учета действующих факторов.

На основании изучения задания делается вывод о характере предстоящих расчетов. В случае расчета функциональной надежности осуществляется переход к этапам **4-5-7**, в случае расчета элементов (аппаратурной надежности) — к этапам **3-6-7**.



Рис. 4.5.2. Алгоритм расчета надежности

Под **структурной схемой надежности** понимается наглядное представление (графическое или в виде логических выражений) условий, при которых работает или не работает исследуемый объект (система, устройство, технический комплекс и т. д.). Типовые структурные схемы представлены на рис. 4.5.3.

Простейшей формой структурной схемы надежности является параллельно-последовательная структура. На ней параллельно соединяются элементы, совместный отказ которых приводит к отказу объекта.

В последовательную цепочку соединяются такие элементы, отказ любого из которых приводит к отказу объекта.

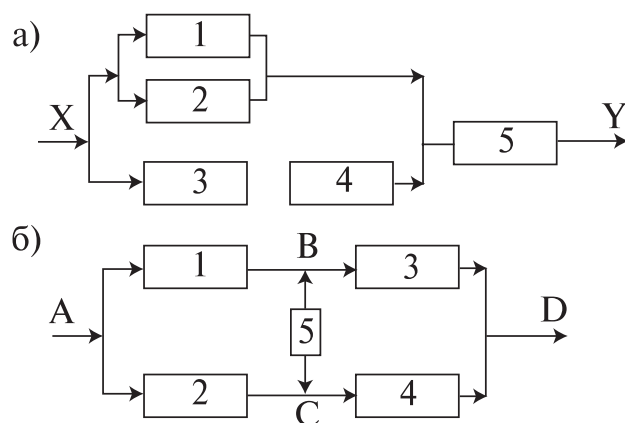


Рис. 4.5.3. Типовые структуры расчета надежности

На рис. 4.5.3, а представлен вариант параллельно-последовательной структуры. По этой структуре можно сделать следующее заключение. Объект состоит из пяти частей. Отказ объекта наступает тогда, когда откажет или элемент 5, или узел, состоящий из элементов 1—4. Узел может отказаться тогда, когда одновременно откажет цепочка, состоящая из элементов 3, 4 и узел, состоящий из элементов 1, 2. Цепь 3—4 отказывает, если откажет хотя бы один из составляющих ее элементов, а узел 1, 2 — если откажут оба элемента, т. е. элементы 1, 2. Расчет надежности при наличии таких структур отличается наибольшей простотой и наглядностью. Однако не всегда удается условие работоспособности представить в виде простой параллельно-последовательной структуры. В таких случаях используют или логические функции, или графы и ветвящиеся структуры, по которым оставляются системы уравнений работоспособности.

На основе структурной схемы надежности составляется набор расчетных формул. Для типовых случаев расчета используются формулы, приведенные в справочниках по расчетам надежности, стандартах и методических указаниях. Прежде чем применять эти формулы, необходимо предварительно изучить их существо и область использования.

4.5.3. Расчет надежности, основанный на использовании параллельно-последовательных структур

Пусть некоторая техническая система D составлена из n элементов (узлов). Допустим, надежности элементов нам известны. Возникает вопрос об определении надежности системы. Она зависит от того, каким образом элементы объединены в систему, какова функция каждого из них и в какой мере исправная работа каждого элемента необходима для работы системы в целом.

Параллельно-последовательная структура надежности сложного изделия дает представление о связи между надежностью изделия и надежностью его элементов. Расчет надежности ведется последовательно — начиная от расчета элементарных узлов структуры к ее все более сложным узлам. Например, в структуре (рис. 4.5.3, а) узел, состоящий из элементов 1—2 — элементарный узел, состоящий из элементов 1—2—3—4 — сложный. Эта структура может быть сведена к эквивалентной, состоящей из элементов 1—2—3—4 и элемента 5, соединенных последовательно. Расчет надежности в данном случае сводится к расчету отдельных участков схемы, состоящих из параллельно и последовательно соединенных элементов.

4.5.3.1. Система с последовательным соединением элементов

Самым простым случаем в расчетном смысле является последовательное соединение элементов системы. В такой системе отказ любого элемента равносителен отказу системы в целом. По аналогии с цепочкой последовательно соединенных проводников, обрыв каждого из которых равносителен

размыканию всей цепи, мы и называем такое соединение «последовательным» (рис. 4.5.4). Следует пояснить, что «последовательным» такое соединение элементов является только в смысле надежности, физически они могут быть соединены как угодно.



Рис. 4.5.4. Блок-схема системы с последовательным соединением элементов

С позиции надежности такое соединение означает, что отказ устройства, состоящего из этих элементов, происходит при отказе элемента 1, или элемента 2, или элемента 3, или элемента n . Условие работоспособности можно сформулировать следующим образом: устройство работоспособно, если работоспособен элемент 1, и элемент 2, и элемент 3, и элемент n .

Выразим надежность данной системы через надежности ее элементов. Пусть имеется некоторый промежуток времени $(0, \tau)$, в течение которого требуется обеспечить безотказную работу системы. Тогда, если надежность системы характеризуется законом надежности $P(t)$, нам важно знать значение этой надежности при $t = \tau$, т. е. $P(\tau)$. Это не функция, а определенное число; отбросим аргумент τ и обозначим надежность системы просто P . Аналогично обозначим надежности отдельных элементов $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$.

Для безотказной работы простой системы в течение времени τ нужно, чтобы безотказно работал каждый из ее элементов. Обозначим S — событие, состоящее в безотказной работе системы за время τ ; $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ — события, состоящие в безотказной работе соответствующих элементов. Событие S есть произведение (совмещение) событий $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$:

$$S = s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \dots \cdot s_n.$$

Предположим, что элементы $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ отказывают **независимо друг от друга** (или, как говорят применительно к надежности, «независимы по отказам», а совсем кратко: «независимы»). Тогда по правилу умножения вероятностей для независимых событий $P(S) = P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(s_3) \cdot \dots \cdot P(s_n)$ или в других обозначениях:

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n, \quad (4.5.1)$$

а короче:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (4.5.2)$$

т. е. надежность (вероятность работоспособного состояния) простой системы, составленной из независимых по отказам, последовательно соединенных элементов, равна произведению надежностей ее элементов.

В частном случае, когда все элементы обладают одинаковой надежностью $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_n$, выражение (4.5.2) принимает вид:

$$P = P^n. \quad (4.5.3)$$

ПРИМЕР 4.5.1. Система состоит из 10 независимых элементов, надежность каждого из которых равна $P=0,95$. Определить надежность системы.

По формуле (4.5.3) $P = 0,95^{10} \approx 0,6$.

Из примера видно, как резко падает надежность системы при увеличении в ней числа элементов. Если число элементов n велико, то для обеспечения хотя бы приемлемой надежности P системы каждый элемент должен обладать очень высокой надежностью.

Поставим вопрос: какой надежностью P должен обладать отдельный элемент для того, чтобы система, составленная из n таких элементов, обладала заданной надежностью P ?

Из формулы (4.5.3) получим:

$$P = \sqrt[n]{P}. \quad (4.5.4)$$

ПРИМЕР 4.5.2. Простая система состоит из 1000 одинаково надежных, независимых элементов. Какой надежностью должен обладать каждый из них для того, чтобы надежность системы была не меньше 0,9?

По формуле (4.5.4) $P = \sqrt[1000]{0,9}$; $\lg 0,9^{1/1000}$; $P \approx 0,9999$.

Интенсивность отказов системы при экспоненциальном законе распределения времени до отказа легко определить из выражения:

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n, \quad (4.5.5)$$

т. е. как сумму интенсивностей отказов независимых элементов. Это и естественно, так как для системы, в которой элементы соединены последовательно, отказ элемента равносителен отказу системы, значит все потоки отказов отдельных элементов складываются в один поток отказов системы с интенсивностью, равной сумме интенсивностей отдельных потоков.

Формула (4.5.4) получается из выражения:

$$P = P_1 P_2 P_3 \dots P_n = \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)\}. \quad (4.5.6)$$

Среднее время работы до отказа:

$$T_0 = 1 / \lambda_c. \quad (4.5.7)$$

ПРИМЕР 4.5.3. Простая система S (рис. 4.5.5) состоит из трех независимых элементов, плотности распределения времени безотказной работы которых заданы формулами:

$$\left. \begin{aligned} f_1(t) &= 1, \\ f_2(t) &= 2t, \\ f_3(t) &= 2(1-t), \end{aligned} \right\} \text{ при } 0 < t < 1.$$

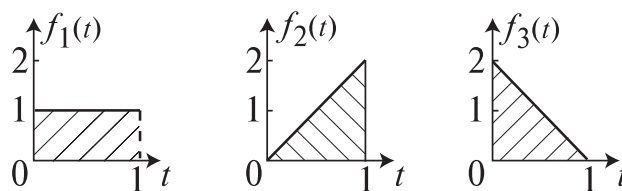


Рис. 4.5.5. Плотности распределения времени безотказной работы

Найти интенсивность отказов системы.

Решение. Определяем ненадежность каждого элемента:

$$\left. \begin{aligned} q_1(t) &= 1, \\ q_2(t) &= t^2, \\ q_3(t) &= 2t - t^2, \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < t < 1.$$

Отсюда надежности элементов:

$$\left. \begin{aligned} p_1(t) &= 1 - t, \\ p_2(t) &= 1 - t^2, \\ p_3(t) &= 1 - 2t + t^2, \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < t < 1.$$

Интенсивности отказов элементов (условная плотность вероятности отказов) — отношение $f(t)$ к $p(t)$:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1(t) &= 1 / (1 - t), \\ \lambda_2(t) &= 2t / (1 - t^2), \\ \lambda_3(t) &= 2(1 - t) / (1 - 2t + t^2), \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < t < 1.$$

Складывая, имеем: $\lambda_c = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \lambda_3(t)$.

ПРИМЕР 4.5.4. Предположим, что для работы системы с последовательным соединением элементов при полной нагрузке необходимы два разнотипных насоса, причем насосы имеют постоянные интенсивности отказов, равные соответственно $\lambda_1 = 0,0001 \text{ ч}^{-1}$ и $\lambda_2 = 0,0002 \text{ ч}^{-1}$. Требуется вычислить среднее время безотказной работы данной системы и вероятность ее безотказной работы в течение 100 ч. Предполагается, что оба насоса начинают работать в момент времени $t = 0$.

С помощью формулы (4.5.6) находим вероятность безотказной работы P_s заданной системы в течение 100 ч:

$$P_s(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

$$P_s(100) = e^{-(0,0001 + 0,0002) \cdot 100} = 0,97045.$$

Используя формулу (4.5.7), получаем:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{1}{0,0001 + 0,0002} = 3333,3 \text{ ч}.$$

4.5.3.2. Система с параллельным соединением элементов

На рис. 4.5.6 представлено параллельное соединение элементов 1, 2, 3. Это означает, что устройство, состоящее из этих элементов, переходит в состояние отказа после отказа всех элементов при условии, что все элементы системы находятся под нагрузкой, а отказы элементов статистически независимы.

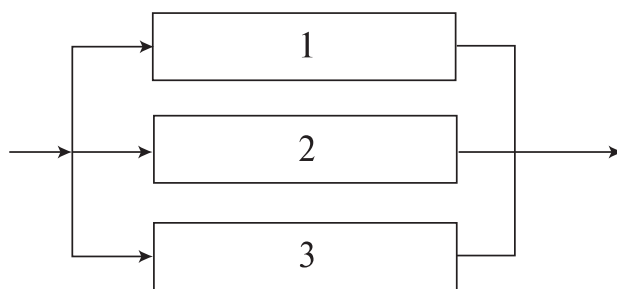


Рис. 4.5.6. Блок-схема системы с параллельным соединением элементов

Условие работоспособности устройства можно сформулировать следующим образом: устройство работоспособно, если работоспособен элемент 1, или элемент 2, или элемент 3, или элементы 1 и 2, 1 и 3, 2 и 3, 1 и 2 и 3.

Вероятность безотказного состояния устройства, состоящего из n параллельно соединенных элементов определяется по теореме сложения вероятностей совместных случайных событий как

$$P = (p_1 + p_2 + \dots + p_n) - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + \dots) - (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_n + \dots) - \dots \pm (p_1 p_2 p_3 \dots p_n). \quad (4.5.8)$$

Для приведенной блок-схемы (рис. 4.5.6), состоящей из трех элементов, выражение (4.5.8) можно записать:

$$P = p_1 + p_2 + p_3 - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) + p_1 p_2 p_3.$$

Применительно к проблемам надежности, по правилу умножения вероятностей независимых (в совокупности) событий, надежность устройства из n элементов вычисляется по формуле:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (4.5.9)$$

т. е. при параллельном соединении независимых (в смысле надежности) элементов их ненадежности $(1 - p_i = q_i)$ перемножаются.

В частном случае, когда надежности всех элементов одинаковы, формула (4.5.9) принимает вид:

$$P = 1 - (1 - p)^n. \quad (4.5.10)$$

ПРИМЕР 4.5.5. Предохранительное устройство, обеспечивающее безопасность работы системы под давлением, состоит из трех дублирующих друг друга клапанов. Надежность каждого из них $p = 0,9$. Клапаны независимы в смысле надежности. Найти надежность устройства.

Решение. По формуле (4.5.10) $P = 1 - (1 - 0,9)^3 = 0,999$.

Интенсивность отказов устройства состоящего из n параллельно соединенных элементов, обладающих постоянной интенсивностью отказов λ_0 , определяется как:

$$\lambda = \frac{dQ(t)dt}{P(t)} = \frac{d(1 - \exp(-\lambda_0 t))^n / dt}{1 - (1 - \exp(-\lambda_0 t))^n} = \frac{n\lambda_0(1 - \exp(-\lambda_0 t))^{n-1}}{1 - (1 - \exp(-\lambda_0 t))^n}. \quad (4.5.11)$$

Из (4.5.11) видно, что интенсивность отказов устройства при $n > 1$ зависит от t : при $t = 0$ она равна нулю, при увеличении t , монотонно возрастает до λ_0 .

Если интенсивности отказов элементов постоянны и подчинены показательному закону распределения, то выражение (4.5.9) можно записать:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t)). \quad (4.5.12)$$

Среднее время безотказной работы системы T_0 находим, интегрируя уравнение (4.5.12) в интервале $[0, \infty]$:

$$\begin{aligned} T_0 &= \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t)) \right\} dt = \\ &= (1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 + \dots + 1/\lambda_n) - (1/(\lambda_1 + \lambda_2) + 1/(\lambda_1 + \lambda_3) + \dots) + \\ &+ (1/(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + 1/(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4) + \dots) + (-1)^{n+1} \times 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i. \end{aligned} \quad (4.5.13)$$

В случае, когда интенсивности отказов всех элементов одинаковы, выражение (4.5.13) принимает вид:

$$T_0 = 1 / \left(\lambda \sum_{i=1}^n 1/i \right). \quad (4.5.14)$$

Среднее время работы до отказа также можно получить, интегрируя уравнение (4.5.8) в интервале $[0, \infty]$.

ПРИМЕР 4.5.6. Предположим, что два одинаковых вентилятора в системе очистки отходящих газов работают параллельно, причем если один из них выходит из строя, то другой способен работать при полной системной нагрузке без изменения своих надежностных характеристик.

Требуется найти безотказность системы в течение 400 ч (продолжительность выполнения задания) при условии, что интенсивности отказов двигателей вентиляторов постоянны и равны $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$, отказы двигателей статистически независимы и оба вентилятора начинают работать в момент времени $t = 0$.

Решение. В случае идентичных элементов формула (4.5.12) принимает вид:

$$P(t) = 2 \exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t).$$

Поскольку $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$ и $t = 400 \text{ ч}$, то:

$$P_{(400)} = 2 \exp(-0,0005 \times 400) - \exp(-2 \times 0,0005 \times 400) = 0,9671.$$

Среднюю наработку на отказ находим, используя (4.5.13):

$$T_0 = 1 / \lambda (1/1 + 1/2) = 1 / \lambda \times 3/2 = 1,5 / 0,0005 = 3000 \text{ ч}.$$

4.5.3.3. Способы преобразования сложных структур

Относительная простота расчетов надежности, основанных на использовании параллельно-последовательных структур, делают их самыми распространенными в инженерной практике. Однако не всегда условие работоспособности можно непосредственно представить параллельно-последовательной структурой. В этом случае можно сложную структуру заменить ее эквивалентной параллельно-последовательной структурой. К таким преобразованиям относятся:

- преобразование с эквивалентной заменой треугольника на звезду и обратно;
- разложение сложной структуры по базовому элементу.

Существо способа **преобразования с помощью эквивалентной замены треугольника на звезду и обратно** заключается в том, что узел сложной конфигурации заменяется на узел другой, более простой конфигурации, но при этом подбираются такие характеристики нового узла, что надежности преобразуемой цепи сохранялись прежними.

Пусть, например, требуется заменить треугольник (рис. 4.5.7, а) звездой (рис. 4.5.7, б) при условии, что вероятность отказа элемента a равна q_{13} , элемента b равна q_{12} , элемента c — q_{23} . Переход к соединению звездой не должен изменить надежность цепей 1—2, 1—3, 2—3. Поэтому значение вероятностей отказов элементов звезды q_1 , q_2 , q_3 должны удовлетворять следующим равенствам:

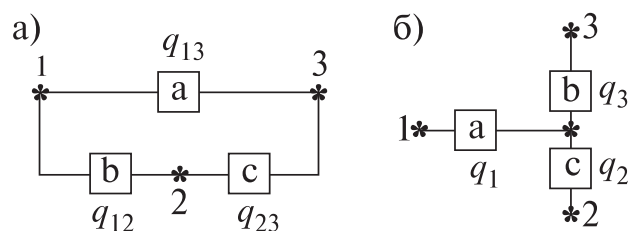


Рис. 4.5.7. Преобразование «треугольник—звезда»

$$\left. \begin{aligned} q_1 + q_2 - q_1 q_2 &= q_{12} (q_{23} + q_{31} - q_{23} q_{31}); \\ q_2 + q_3 - q_2 q_3 &= q_{23} (q_{31} + q_{12} - q_{31} q_{12}); \\ q_3 + q_1 - q_3 q_1 &= q_{31} (q_{12} + q_{23} - q_{12} q_{23}). \end{aligned} \right\} \quad (4.5.15)$$

Если пренебречь произведениями вида $q_i q_j$; $q_i q_j q_k$, то в результате решения системы уравнения (4.5.15) можно записать:

$$q_1 = q_{12} q_{31}; q_2 = q_{23} q_{12}; q_3 = q_{31} q_{23}. \quad (4.5.16)$$

Для обратного преобразования звезды в треугольник:

$$q_{12} = \sqrt{q_1 q_2 / q_3}; q_{23} = \sqrt{q_2 q_3 / q_1}; q_{31} = \sqrt{q_1 q_3 / q_2}. \quad (4.5.17)$$

ПРИМЕР 4.5.7. Определить вероятность безотказной работы устройства, структурная схема которого изображена на рис. 4.5.3, б, если известно, что вероятности безотказной работы каждого из элементов схемы равны 0,9, а вероятности отказов равны 0,1.

Решение.

1. Преобразуем соединение элементов 1, 2, 5 в треугольник (рис. 4.5.8, а), в звезду (рис. 4.5.8, б).

2. Определим эквивалентные значения вероятности отказов для новых элементов a , b , c :

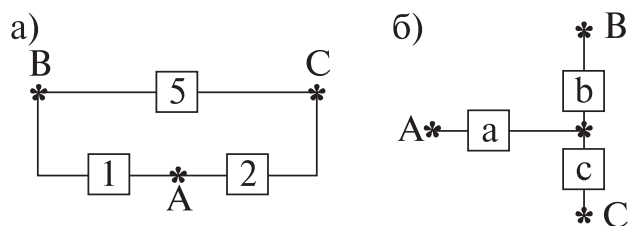


Рис. 4.5.8. К примеру преобразования структуры

$$q_a = q_1 q_2 = 0,1 \times 0,1 = 0,01;$$

$$q_b = q_1 q_5 = 0,1 \times 0,1 = 0,01;$$

$$q_c = q_2 q_5 = 0,1 \times 0,1 = 0,01.$$

3. Определим значения вероятности безотказного состояния элементов эквивалентной схемы (рис. 4.5.8, б):

$$p_a = p_b = p_c = 0,99.$$

4. Определим вероятность безотказной работы эквивалентного устройства (рис. 4.5.9):

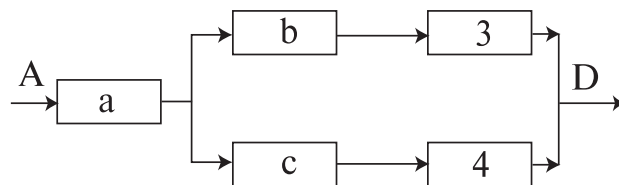


Рис. 4.5.9. Преобразованная структура

$$\begin{aligned} P &= p_a(p_b p_3 + p_c p_4 - p_b p_3 p_c p_4) = \\ &= 0,99(0,99 \times 0,9 + 0,99 \times 0,9 - 0,99 \times 0,9 \times 0,99 \times 0,9) = 0,978. \end{aligned}$$

Способ **преобразования с помощью разложения сложной структуры по некоторому базовому элементу** основан на использовании теоремы о сумме вероятностей несовместных событий. В сложной структуре выбирают базовый элемент (или группу базовых элементов) и делаются следующие допущения:

- базовый элемент находится в работоспособном состоянии;
- базовый элемент находится в отказавшем состоянии.

Для этих случаев, представляющих собой два несовместных события, исходная структура преобразовывается в две новые схемы. В первой из них вместо базового элемента ставится «короткое замыкание» цепи, а во второй — разрыв. Вероятности безотказной работы каждой из полученных простых структур вычисляются и умножаются: первая — на вероятность безотказного состояния базового элемента, вторая — на вероятность отказа базового элемента. Полученные произведения складываются. Сумма равна искомой вероятности безотказной работы сложной структуры.

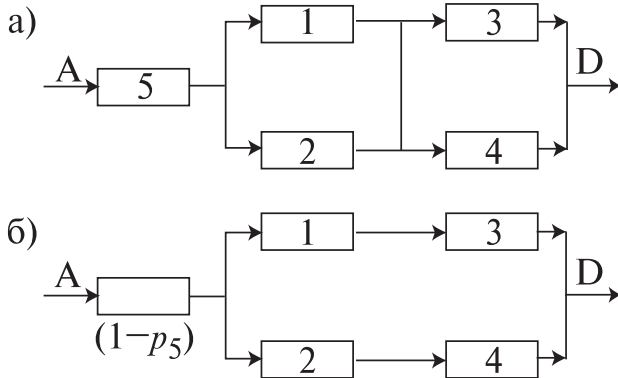
ПРИМЕР 4.5.8. Решить предыдущий пример методом разложения сложной структуры.

Решение.

1. В качестве базового элемента примем элемент 5 (рис. 4.5.3, б).

2. Закоротим базовый элемент, т. е. сделаем допущение об абсолютной его проводимости. Присоединим к полученной структуре последовательно базовый элемент с характеристикой его надежности p_5 . В результате вместо исходной структуры получим новую структуру (рис. 4.5.10, а).

3. Произведем обрыв базового элемента, т. е. сделаем предположение об его абсолютной ненадежности (непроводимости). К полученной структуре присоединим последовательно базовый элемент с характеристикой его ненадежности $(1 - p_5)$. В результате получим структуру (рис. 4.5.10, б).



4. Искомая вероятность равна сумме вероятностей структур (рис. 4.5.10, а, б), каждая из которых параллельно-последовательная. Поэтому:

Рис. 4.5.10. Пример разложения мостиковой структуры по базовому элементу

$$\begin{aligned}
 P &= p_5[(p_1 + p_2 - p_1 p_2)(p_3 + p_4 - p_3 p_4)] + \\
 &+ (1 - p_5)[p_1 p_3 + p_2 p_4 - p_1 p_3 p_2 p_4] = \\
 &= 0,9[(0,9 + 0,9 - 0,9 \times 0,9) \times (0,9 + 0,9 - 0,9 \times 0,9)] + \\
 &+ (1 - 0,9) \times [0,9 \times 0,9 + 0,9 \times 0,9 - 0,9 \times 0,9 \times 0,9 \times 0,9] \approx 0,978.
 \end{aligned}$$

Вероятность безотказной работы мостиковой схемы, состоящей из пяти неодинаковых и независимых элементов, можно определить по формуле:

$$\begin{aligned}
 P &= 2p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 - p_1 p_2 p_4 p_5 - \\
 &p_1 p_2 p_3 p_5 - p_1 p_2 p_3 p_4 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 + p_1 p_4 + p_2 p_5.
 \end{aligned} \quad (4.5.18)$$

В случае идентичных элементов эта формула принимает вид:

$$P = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2. \quad (4.5.19)$$

Подставляя соотношение (4.5.19) в формулу (4.5.6), получаем, что в случае использования элементов с постоянной интенсивностью отказов (экспоненциальном законе распределения отказов):

$$P(t) = 2 \exp(-5\lambda t) - 5 \exp(-4\lambda t) + 2 \exp(-3\lambda t) + 2 \exp(-2\lambda t). \quad (4.5.20)$$

Среднее время безотказной работы системы T_0 находим путем интегрирования уравнения (4.5.20) в интервале $[0, \infty]$:

$$\begin{aligned}
 T_0 &= \int_0^{\infty} 2 \exp(-5\lambda t) - 5 \exp(-4\lambda t) + 2 \exp(-3\lambda t) + 2 \exp(-2\lambda t) = \\
 &= (49 / 60) \times (1 / \lambda).
 \end{aligned} \quad (4.5.21)$$

ПРИМЕР 4.5.9. Определить вероятность безотказной работы устройства, структурная схема которого изображена на рис. 4.5.3, б, если известно, что вероятности безотказной работы каждого из элементов схемы равны 0,9.

Решение.

Так как все элементы идентичны, воспользуемся формулой (4.5.18), с ее помощью получаем:

$$P = 2 \times 0,9^5 - 5 \times 0,9^4 + 2 \times 0,9^3 + 2 \times 0,9^2 \approx 0,978.$$

ПРИМЕР 4.5.10. Требуется определить вероятность безотказной работы и среднюю наработку на отказ системы, состоящей из пяти независимых и одинаковых элементов, соединенных по мостиковой схеме (рис. 4.5.3, б); считается, что $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$, $t = 100 \text{ ч}$ и все элементы начинают работать в момент времени $t = 0$.

Решение.

1. С помощью формулы (4.5.20) получаем:

$$P_{(100)} = 2e^{-0,25} - 5e^{-0,2} + 2e^{-0,15} + 2e^{-0,1} = 0,9999.$$

2. Подставляя полученное значение вероятности безотказной работы в формулу (4.5.21), находим среднюю наработку на отказ:

$$T_0 = 49 / (60 \times 0,0005) = 1633,4 \text{ ч.}$$

4.5.4. Надежность резервированной системы

Одним из путей повышения надежности системы является введение в нее резервных (дублирующих) элементов. Резервные элементы включаются в систему как бы «параллельно» тем, надежность которых недостаточна.

4.5.4.1. Параллельное соединение резервного оборудования системы

Рассмотрим самый простой пример резервированной системы — параллельное соединение резервного оборудования системы. В этой схеме все n одинаковых образцов оборудования работают одновременно, и каждый образец оборудования имеет одинаковую интенсивность отказов. Такая картина наблюдается, например, если все образцы оборудования держатся под рабочим напряжением (так называемый «горячий резерв»), а для исправной работы системы должен быть исправен хотя бы один из n образцов оборудования.

В этом варианте резервирования применимо правило определения надежности параллельно соединенных независимых элементов. В нашем случае, когда надежности всех элементов одинаковы, надежность блока определяется по формуле (4.5.10)

$$P = 1 - (1 - p)^n.$$

Если система состоит из n образцов резервного оборудования с различными интенсивностями отказов, то:

$$P(t) = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_n). \quad (4.5.22)$$

Выражение (4.5.22) представляется как биномиальное распределение. Поэтому ясно, что когда для работы системы требуется по меньшей мере k исправных из n образцов оборудования, то:

$$P(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p^i (1 - p)^{n-i}, \text{ где } \binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}. \quad (4.5.23)$$

При постоянной интенсивности отказов 1 элементов это выражение принимает вид:

$$P(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p_i \frac{(1-p)^n}{(1-p)^i}, \quad (4.5.24)$$

где: $p = \exp(-\lambda t)$.

4.5.4.2. Включение резервного оборудования системы замещением

В данной схеме включения n одинаковых образцов оборудования только один находится все время в работе (рис. 4.5.11). Когда работающий образец выходит из строя, его непременно отключают, и в работу вступает один из $(n - 1)$ резервных (запасных) элементов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все $(n - 1)$ резервных образцов не будут исчерпаны.

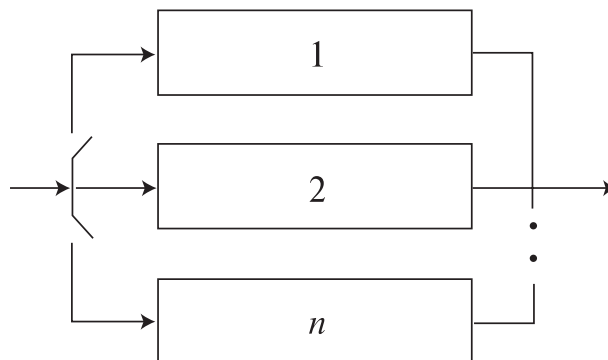


Рис. 4.5.11. Блок-схема системы включения резервного оборудования системы замещением

Примем для этой системы следующие допущения:

1. Отказ системы происходит, если откажут все n элементов.
2. Вероятность отказа каждого образца оборудования не зависит от состояния остальных $(n - 1)$ образцов (отказы статистически независимы).
3. Отказывать может только оборудование, находящееся в работе, и условная вероятность отказа в интервале $(t, t + dt)$ равна λdt ; запасное оборудование не может выходить из строя до того, как оно будет включено в работу.
4. Переключающие устройства считаются абсолютно надежными.
5. Все элементы идентичны. Резервные элементы имеют характеристики как новые.

Система способна выполнять требуемые от нее функции, если исправен по крайней мере один из n образцов оборудования. Таким образом, в этом случае надежность равна просто сумме вероятностей состояний системы, исключая состояние отказа, т. е.:

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{n-1} (\lambda t)^i / i!. \quad (4.5.25)$$

В качестве примера рассмотрим систему, состоящую из двух резервных образцов оборудования, включаемых замещением. Для того чтобы эта система работала, в момент времени t , нужно, чтобы к моменту t были исправны либо оба образца, либо один из двух. Поэтому:

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{n-1} (\lambda t)^i / i! = (\exp(-\lambda t))(1 + \lambda t). \quad (4.5.26)$$

На рис. 4.5.12 показан график функции $P(t)$ и для сравнения приведен аналогичный график для нерезервированной системы.

ПРИМЕР 4.5.11. Система состоит из двух идентичных устройств, одно из которых функционирует, а другое находится в режиме ненагруженного резерва. Интенсивности отказов обоих устройств постоянны. Кроме того, предполагается, что в начале работы резервное устройство имеет такие же характеристики, как и новое. Требуется вычислить вероятность безотказной работы системы в течение 100 ч при условии, что интенсивности отказов устройств $\lambda = 0,001 \text{ ч}^{-1}$.

Решение. С помощью формулы (4.5.25) получаем:

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \cdot (1 + \lambda t).$$

При заданных значениях t и λ вероятность безотказной работы системы составляет:

$$P(t) = e^{-0,1} (1 + 0,1) = 0,9953.$$

Во многих случаях нельзя предполагать, что запасное оборудование не выходит из строя, пока его не включат в работу. Пусть λ_1 — интенсивность отказов работающих образцов, а λ_2 — резервных или запасных ($\lambda_2 > 0$). В случае дублированной системы функция надежности имеет вид:

$$P(t) = \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2)t) + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2} \exp(-\lambda_1 t) - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2} \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2)t).$$

Данный результат для $k = 2$ можно распространить на случай $k = n$. Действительно:

$$P(t) = \exp(-\lambda_1 (1 + \alpha(n-1))t) \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(\exp(\alpha\lambda_1 t) - 1)^k}{\alpha^k k!} \times \right. \\ \left. \times \prod_{j=0}^{k-1} [1 + \alpha(n-1-j)] \right\}, \text{ где } \alpha = \lambda_2 / \lambda_1 > 0. \quad (4.5.27)$$

4.5.4.3. Надежность резервированной системы в случае комбинаций отказов и внешних воздействий

В некоторых случаях отказ системы возникает вследствие определенных комбинаций отказов образцов входящих в систему оборудования и (или) из-за внешних воздействий на эту систему. Рассмотрим, например, метеоспутник с двумя передатчиками информации, один из которых является резервным или запасным. Отказ системы (потеря связи со спутником) возни-

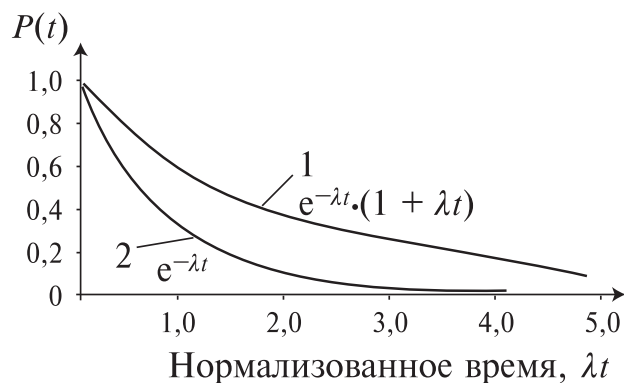


Рис. 4.5.12. Функции надежности для дублированной системы
1 — с включением резерва замещением;
2 — нерезервированной системы

кает при выходе из строя двух передатчиков или в тех случаях, когда солнечная активность создает непрерывные помехи радиосвязи. Если интенсивность отказов работающего передатчика равна λ , а φ — ожидаемая интенсивность появления радиопомех, то функция надежности системы:

$$P(t) = \exp(-(\lambda + \varphi)t) + \lambda t \exp(-(\lambda + \varphi)t). \quad (4.5.28)$$

Данный тип модели также применим в случаях, когда резерв по схеме замещения отсутствует. Например, предположим, что нефтепровод подвергается гидравлическим ударам, причем воздействие незначительными гидроударами происходит с интенсивностью λ , а значительными — с интенсивностью φ . Для разрыва сварных швов (из-за накопления повреждений) трубопроводу следует получить n малых гидроударов или один значительный.

Здесь состояние процесса разрушения представляется числом ударов (или повреждений), причем один мощный гидроудар равносителен n малых. Надежность или вероятность того, что трубопровод не будет разрушен действием микроударов к моменту времени t равна:

$$P(t) = \exp(-(\lambda + \varphi)t) \sum_{i=0}^{n-1} (\lambda t)^i / i!. \quad (4.5.29)$$

4.5.4.4. Анализ надежности систем при множественных отказах

Рассмотрим метод анализа надежности нагруженных элементов в случае статистически независимых и зависимых (множественных) отказов. Следует заметить, что этот метод может быть применен и в случае других моделей и распределений вероятностей. При разработке этого метода предполагается, что для каждого элемента системы существует некоторая вероятность появления множественных отказов.

Как известно, множественные отказы действительно существуют, и для их учета в соответствующие формулы вводится параметр α . Этот параметр может быть определен на основе опыта эксплуатации резервированных систем или оборудования и представляет собой долю отказов, вызываемых общей причиной. Другими словами, параметр α можно рассматривать как точечную оценку вероятности того, что отказ некоторого элемента относится к числу множественных отказов. При этом можно считать, что интенсивность отказов элемента имеет две взаимоисключающие составляющие, т. е. $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, где λ_1 — постоянная интенсивность статистически независимых отказов элемента; λ_2 — интенсивность множественных отказов резервированной системы или элемента. Поскольку $\alpha = \lambda_2 / \lambda$, то $\lambda_2 = \alpha / \lambda$, и следовательно, $\lambda_1 = (1 - \alpha)\lambda$.

Приведем формулы и зависимости для вероятности безотказной работы, интенсивности отказов и средней наработки на отказ в случае систем с параллельным и последовательным соединением элементов, а также систем

с k исправными элементами из n и систем, элементы которых соединены по мостиковой схеме.

Система с параллельным соединением элементов (рис. 4.5.13) — обычная параллельная схема, к которой последовательно подсоединен один элемент. Параллельная часть (I) схемы отображает независимые отказы в любой системе из n элементов, а последовательно соединенный элемент (II) — все множественные отказы системы.

Гипотетический элемент, характеризующийся определенной вероятностью появления множественного отказа, последовательно соединен с элементами, которые характеризуются независимыми отказами. Отказ гипотетического последовательно соединенного элемента

(т. е. множественный отказ) приводит к отказу всей системы. Предполагается, что все множественные отказы полностью взаимосвязаны. Вероятность безотказной работы такой системы определяется как

$R_p = \{1 - (1 - R_1)^n\}R_2$, где n — число одинаковых элементов; R_1 — вероятность безотказной работы элементов, обусловленная независимыми отказами; R_2 — вероятность безотказной работы системы, обусловленная множественными отказами.

При постоянных интенсивностях отказов λ_1 и λ_2 выражение для вероятности безотказной работы принимает вид:

$$R_p(t) = \{1 - (1 - e^{-(1-\alpha)\lambda_1 t})^n\}e^{-\alpha\lambda_1 t}, \quad (4.5.30)$$

где: t — время.

Влияние множественных отказов на надежность системы с параллельным соединением элементов наглядно демонстрируется с помощью рис. 4.5.14—4.5.16; при увеличении значения параметра α вероятность безотказной работы такой системы уменьшается.

Параметр α принимает значения от 0 до 1. При $\alpha = 0$ модифицированная параллельная схема ведет себя, как обычная параллельная схема, а при $\alpha = 1$ она действует как один элемент, т. е. все отказы системы являются множественными.

Поскольку интенсивность отказов и среднее время наработки на отказ любой системы можно определить с помощью (4.3.7) и формул:

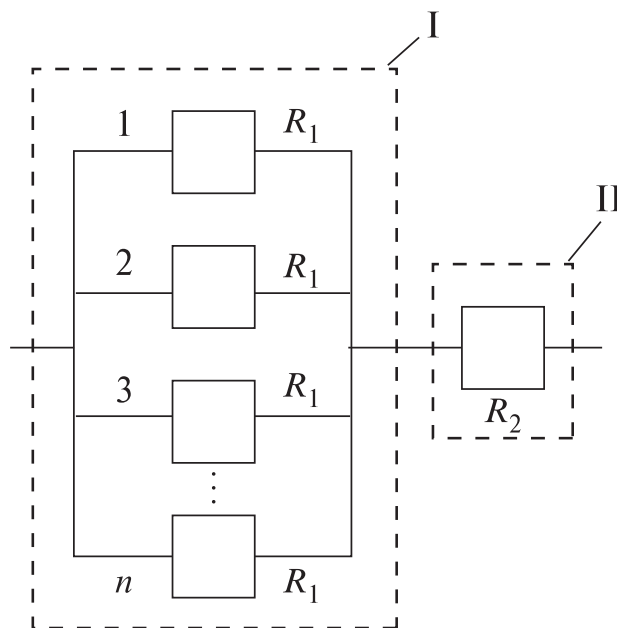


Рис. 4.5.13. Модифицированная система с параллельным соединением одинаковых элементов

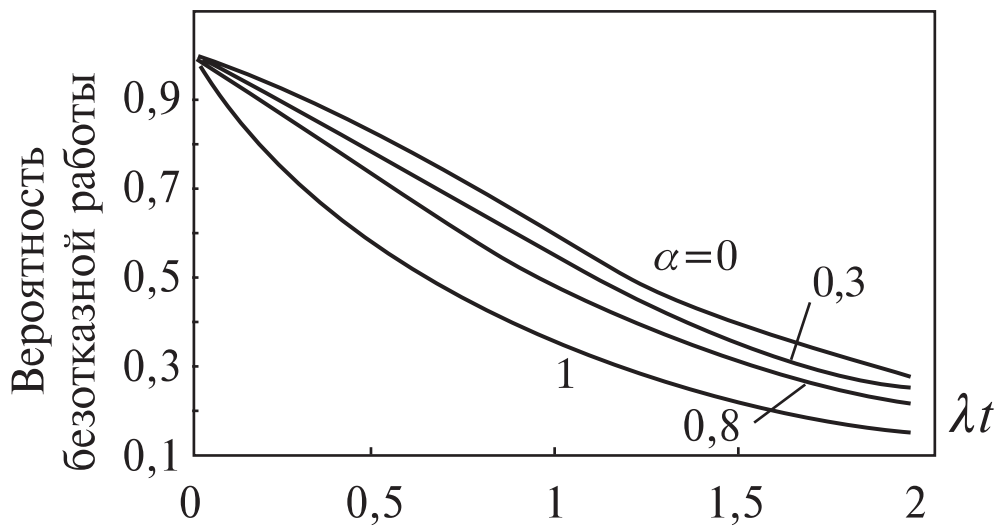


Рис. 4.5.14. Зависимость вероятности безотказной работы системы с параллельным соединением двух элементов от параметра α

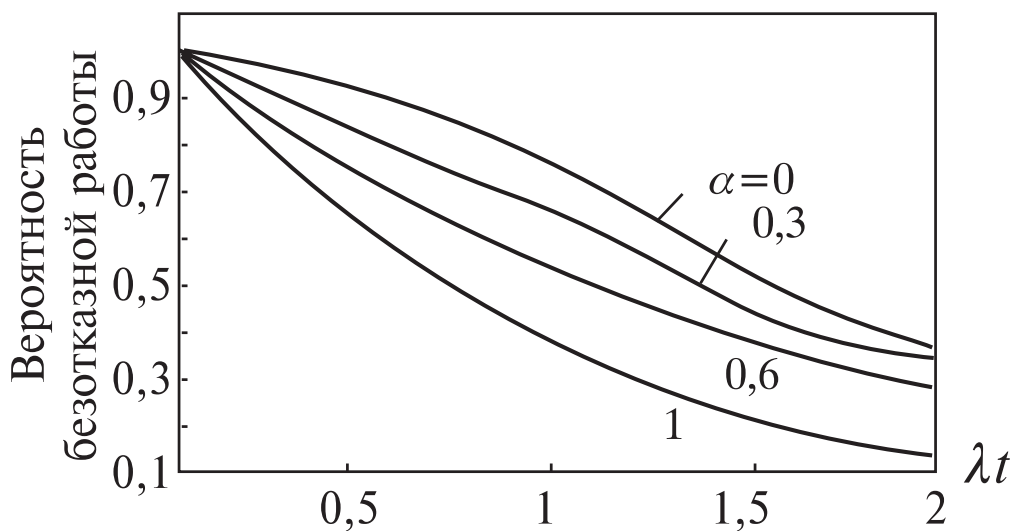


Рис. 4.5.15. Зависимость вероятности безотказной работы системы с параллельным соединением трех элементов от параметра α

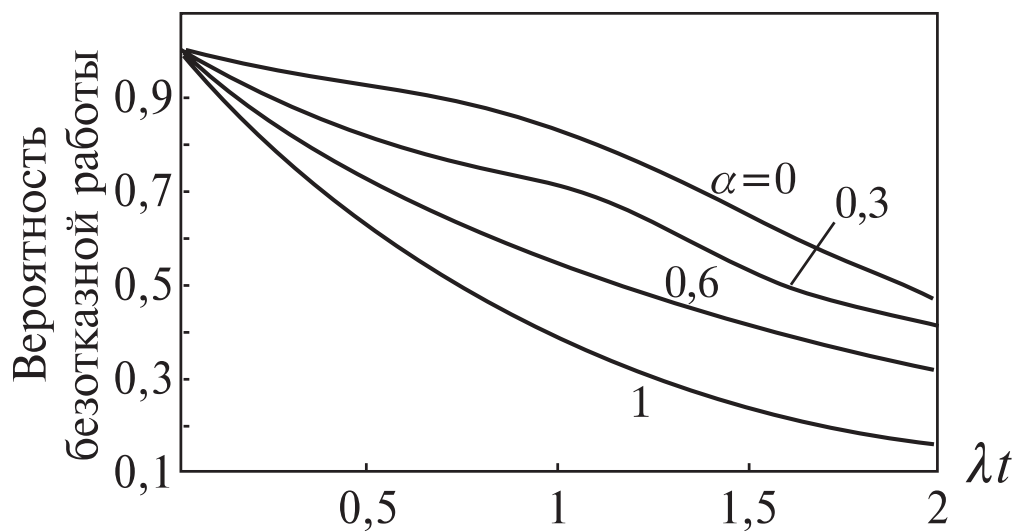


Рис. 4.5.16. Зависимость вероятности безотказной работы системы с параллельным соединением четырех элементов от параметра α

$$\lambda_p(t) = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt},$$

$$T_0 = \int_0^{\infty} R(t) dt.$$

с учетом выражения для $R_p(t)$ получаем, что интенсивность отказов (рис. 4.5.17) и средняя наработка на отказ модифицированной системы соответственно равны:

$$\lambda_p(t) = \alpha\lambda + n\lambda(1-\alpha) \left\{ \frac{\gamma-1}{\gamma^n-1} \right\}, \quad (4.5.31)$$

$$T_0^M = \sum_{j=1}^n \frac{(-1)^{j+1} \binom{n}{j}}{\lambda \{j - (j-1)\beta\}}, \quad \text{где } \gamma = \frac{1}{1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}}. \quad (4.5.32)$$

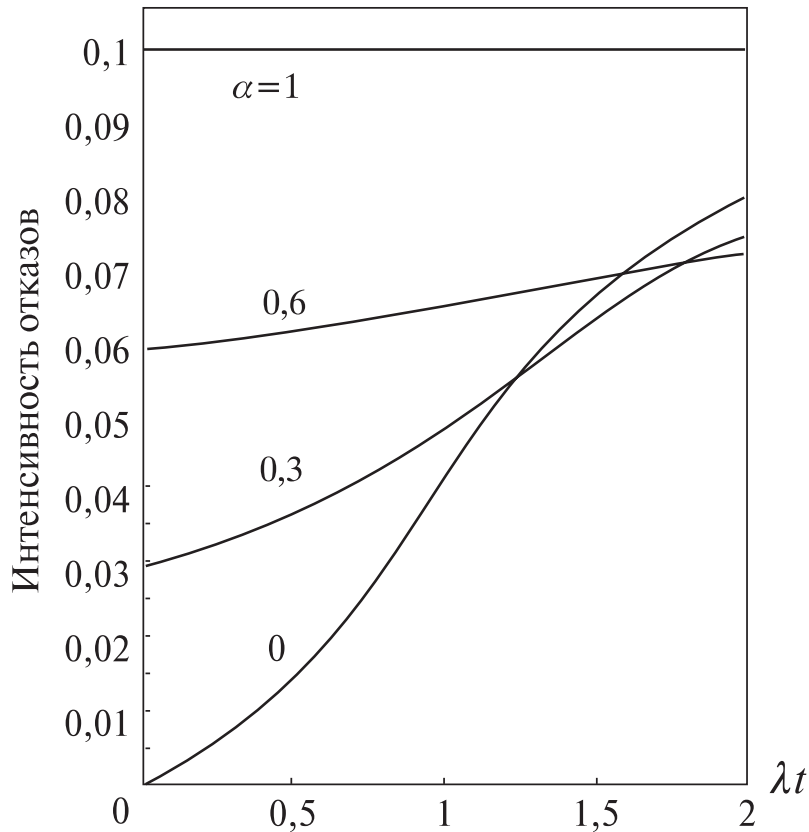


Рис. 4.5.17. Зависимость интенсивности отказов системы с параллельным соединением четырех элементов от параметра α

ПРИМЕР 4.5.12. Требуется определить вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух одинаковых параллельно соединенных элементов, если $\lambda = 0,001 \text{ ч}^{-1}$; $\alpha = 0,071$; $t = 200 \text{ ч}$.

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух одинаковых параллельно соединенных элементов, для которой характерны множе-

ственные отказы, равна 0,95769. Вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух параллельно соединенных элементов и характеризуемой только независимыми отказами, равна 0,96714.

Система с k исправными элементами из n одинаковых элементов включает в себя гипотетический элемент, соответствующий множественным отказам и соединенный последовательно с обычной системой типа k из n , для которой характерны независимые отказы. Отказ, отображаемый этим гипотетическим элементом, вызывает отказ всей системы. Вероятность безотказной работы модифицированной системы с k исправными элементами из n можно вычислить по формуле:

$$R_{kn} = \left\{ \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} R_1^r (1 - R_1)^{n-r} \right\} R_2, \quad (4.5.33)$$

где: R_1 — вероятность безотказной работы элемента, для которого характерны независимые отказы;

R_2 — вероятность безотказной работы системы с k исправными элементами из n , для которой характерны множественные отказы.

При постоянных интенсивностях λ_1 и λ_2 полученное выражение принимает вид:

$$R_{kn}(t) = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} e^{-r(1-\alpha)\lambda t} \left\{ 1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t} \right\}^{n-r} e^{-\alpha\lambda t}. \quad (4.5.34)$$

Зависимость вероятности безотказной работы от параметра α для систем с двумя исправными элементами из трех и двумя и тремя исправными элементами из четырех показаны на рис. 4.5.18—4.5.20. При увеличении параметра α вероятность безотказной работы системы уменьшается на небольшую величину (λt).

Интенсивность отказов системы с k исправными элементами из n и средняя наработка на отказ могут быть определены следующим образом:

$$\lambda_{kn}(t) = \frac{\left\{ \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} [(r\alpha - r - \alpha)\lambda] \theta [\eta^{(n-r)}] + \theta \lambda (n-r)(1-\alpha) \eta^{(n-r-1)} (1-\eta) \right\}}{\sum_{r=k}^n \binom{n}{r} \theta \eta^{(n-r)}}, \quad (4.5.35)$$

где: $\eta = \{1 - e^{-(1-\beta)\lambda t}\}$

$\theta = e^{(r\alpha - r - \alpha)\lambda t}$

и

$$T_0 = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} \left[\frac{1}{r - r\alpha + \alpha} - \frac{n-r}{(r - r\alpha + 1)\lambda} + \frac{(n-r)(n-r-1)}{2!(r - r\alpha - \alpha + 2)\lambda} - \frac{(n-r)(n-r-1)(n-r-2)}{3!} \cdot \frac{1}{(r + 3 - r\alpha - 2\alpha)\lambda} + \dots \right]. \quad (4.5.36)$$

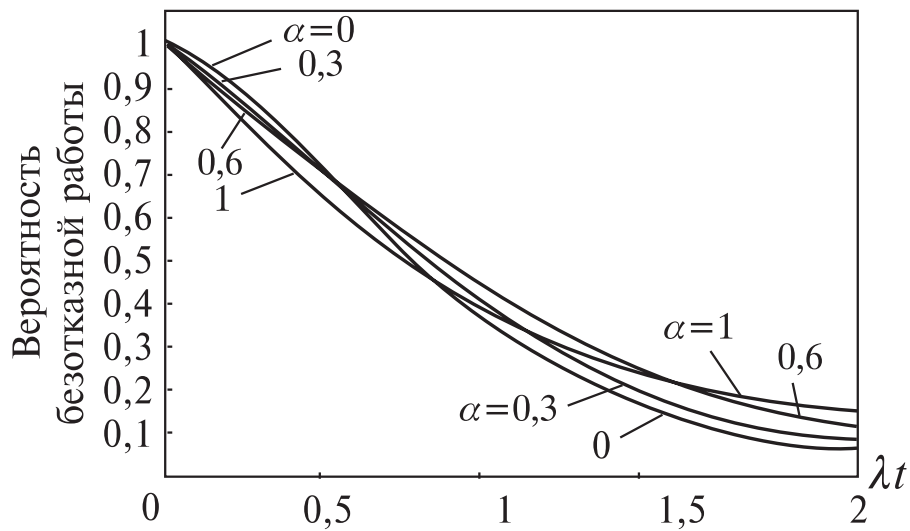


Рис. 4.5.18. Вероятность безотказной работы системы, сохраняющей работоспособность при отказе двух из n элементов

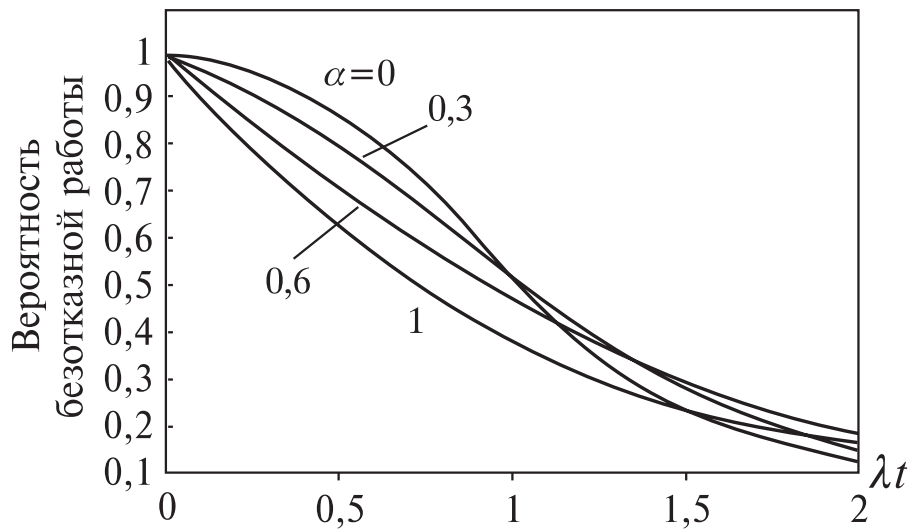


Рис. 4.5.19. Вероятность безотказной работы системы, сохраняющей работоспособность при отказе двух из четырех элементов

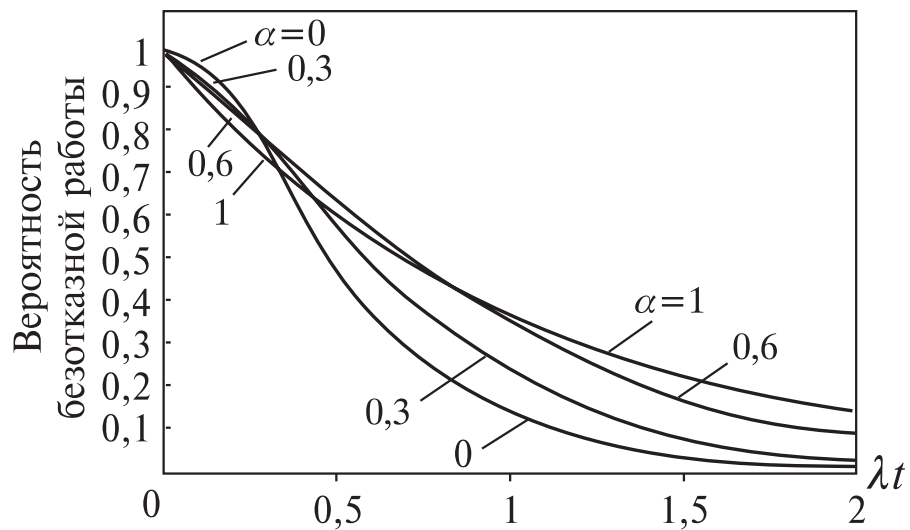


Рис. 4.5.20. Вероятность безотказной работы системы, сохраняющей работоспособность при отказе трех из четырех элементов

ПРИМЕР 4.5.13. Требуется определить вероятность безотказной работы системы с двумя исправными элементами из трех, если $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$; $\alpha = 0,3$; $t = 200 \text{ ч}$.

С помощью выражения для R_{kn} находим, что вероятность безотказной работы системы, в которой происходили множественные отказы, составляет 0,95772. Отметим, что для системы с независимыми отказами эта вероятность равна 0,97455.

Система с параллельно-последовательным соединением элементов соответствует системе, состоящей из одинаковых элементов, для которых характерны независимые отказы, и ряда ветвей, содержащих воображаемые элементы, для которых характерны множественные отказы. Вероятность безотказной работы модифицированной системы с параллельно-последовательным (смешанным) соединением элементов можно определить с помощью формулы $R_{ps} = [1 - 1(1 - R_1^m)^n] R_2$, где m — число одинаковых элементов в ответвлении, n — число одинаковых ответвлений.

При постоянных интенсивностях отказов λ_1 и λ_2 это выражение принимает вид:

$$R_{ps}(t) = [1 - 1(1 - e^{-n(1-\alpha)\lambda t})^m] e^{-\alpha\lambda t}. \quad (4.5.37)$$

Интенсивность отказов системы с параллельно-последовательным соединением элементов и средняя наработка на отказ могут быть определены следующим образом:

$$\lambda_{ps}(t) = \alpha\lambda + mn(1 - \alpha)\lambda \frac{(\gamma - 1)}{(\gamma^m - 1)}, \quad (4.5.38)$$

где $\lambda = 1 / [1 - e^{-n(1-\gamma)\lambda t}]$ и

$$T_0 = \frac{\sum_{j=k}^n \binom{m}{j} (-1)^{j+1}}{\{\lambda\alpha + n\lambda(j - \alpha j)\}}. \quad (4.5.39)$$

Система, элементы которой соединены по **мостиковой схеме**, соответствует схеме, состоящей из одинаковых элементов, для которых характерны независимые отказы, и последовательно подсоединенного к ним воображаемого элемента, для которого характерны множественные отказы. При множественном отказе гипотетического элемента вся система выходит из строя. Вероятность безотказной работы модифицированной системы с элементами, соединенными по мостиковой схеме, можно вычислить по формуле:

$$R_b = \{1 - 2(1 - R_1)^5 + 5(1 - R_1)^4 - 2(1 - R_1)^3 - 2(1 - R_1)^2\} R_2. \quad (4.5.40)$$

(здесь R_b — вероятность безотказной работы мостиковой схемы, для которой характерны множественные отказы). Эта формула при постоянных интенсивностях λ_1 и λ_2 принимает вид:

$$R_b(t) = \{1 - 2(1 - e^{-At})^5 + 5(1 - e^{-At})^4 - 2(1 - e^{-At})^3 - 2(1 - e^{-At})^2\}e^{-\beta\lambda t}, \quad (4.5.41)$$

(здесь $A = (1 - \alpha)\lambda$). Зависимость безотказной работы системы $R_b(t)$ для различных параметров α показана на рис. 4.5.21. При малых значениях λt вероятность безотказной работы системы с элементами, соединенными по мостиковой схеме, убывает с увеличением параметра α .

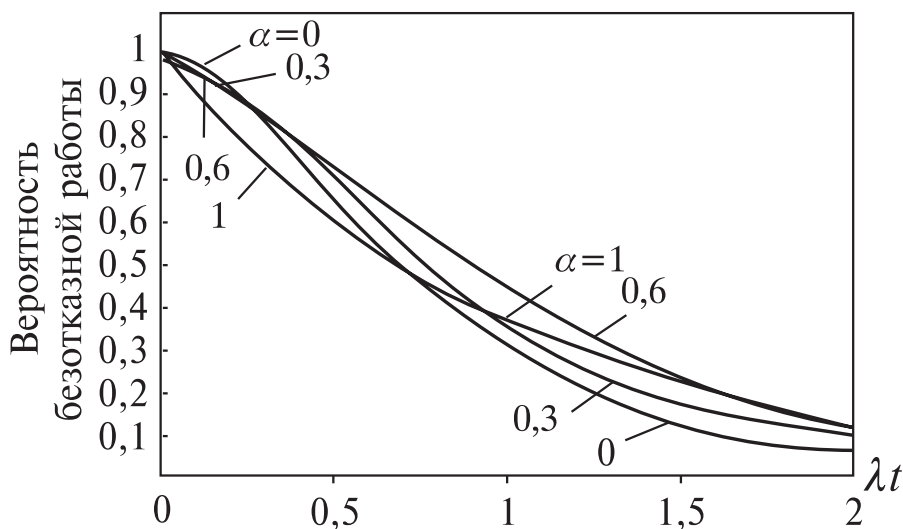


Рис. 4.5.21. Зависимость вероятности безотказной работы системы, элементы которой соединены по мостиковой схеме, от параметра α

Интенсивность отказов рассматриваемой системы и средняя наработка на отказ могут быть определены следующим образом:

$$\lambda_{kn}(t) = \beta\lambda + A(-8\pi^5 + 25\pi^4 - 24\pi^3 + 4\pi^2 + 4\pi) + \frac{-2\pi^5 + 5\pi^4 - 2\pi^3 - 2\pi^2}{1 - 2\pi^5 + 5\pi^4 - 2\pi^3 - 2\pi^2}, \quad (4.5.40)$$

где $\pi = (1 - e^{-At})$ и

$$T_0 = \frac{2}{(2 - \alpha)\lambda} + \frac{2}{(3 - 2\alpha)\lambda} + \frac{5}{(4 - 3\alpha)\lambda} + \frac{2}{(5 - 4\alpha)\lambda}. \quad (4.5.41)$$

ПРИМЕР 4.5.14. Требуется вычислить вероятность безотказной работы в течение 200 ч для системы с одинаковыми элементами, соединенными по мостиковой схеме, если $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$ и $\alpha = 0,3$.

Используя выражение для $R_b(t)$, находим, что вероятность безотказной работы системы с соединением элементов по мостиковой схеме составляет примерно 0,96; для системы с независимыми отказами (т. е. при $\alpha = 0$) эта вероятность равна 0,984.

4.5.4.5. Модель надежности системы с множественными отказами

Для анализа надежности системы, состоящей из двух неодинаковых элементов, для которых характерны множественные отказы, рассмотрим такую модель, при построении которой были сделаны следующие допущения и приняты следующие обозначения:

Допущения (1) множественные отказы и отказы других типов статистически независимы; (2) множественные отказы связаны с выходом из строя не менее двух элементов; (3) при отказе одного из нагруженных резервированных элементов отказавший элемент восстанавливается, при отказе обоих элементов восстанавливается вся система; (4) интенсивность множественных отказов и интенсивность восстановлений постоянны.

Обозначения

$P_0(t)$ — вероятность того, что в момент времени t оба элемента функционируют;

$P_1(t)$ — вероятность того, что в момент времени t элемент 1 вышел из строя, а элемент 2 функционирует;

$P_2(t)$ — вероятность того, что в момент времени t элемент 2 вышел из строя, а элемент 1 функционирует;

$P_3(t)$ — вероятность того, что в момент времени t элементы 1 и 2 вышли из строя;

$P_4(t)$ — вероятность того, что в момент времени t имеются специалисты и запасные элементы для восстановления обоих элементов;

λ_i — постоянная интенсивность отказов элементов 1 и 2 ($i = 1, 2$);

μ_i — постоянная интенсивность восстановлений элементов 1 и 2 ($i = 1, 2$);

μ_3 — постоянная интенсивность восстановлений элементов 1 и 2;

α — постоянный коэффициент, характеризующий наличие специалистов и запасных элементов;

β — постоянная интенсивность множественных отказов;

t — время.

Рассмотрим три возможных случая восстановления элементов при их одновременном отказе:

Случай 1. Запасные элементы, ремонтный инструмент и квалифицированные специалисты имеются для восстановления обоих элементов, т. е. элементы могут быть восстановлены одновременно.

Случай 2. Запасные элементы, ремонтный инструмент и квалифицированные специалисты имеются только для восстановления одного элемента, т. е. может быть восстановлен только один элемент.

Случай 3. Запасные элементы, ремонтный инструмент и квалифицированные специалисты отсутствуют, и, кроме того, может существовать очередь на ремонтное обслуживание.

Математическая модель системы, изображенной на рис. 4.5.22, представляет собой следующую систему дифференциальных уравнений первого порядка:

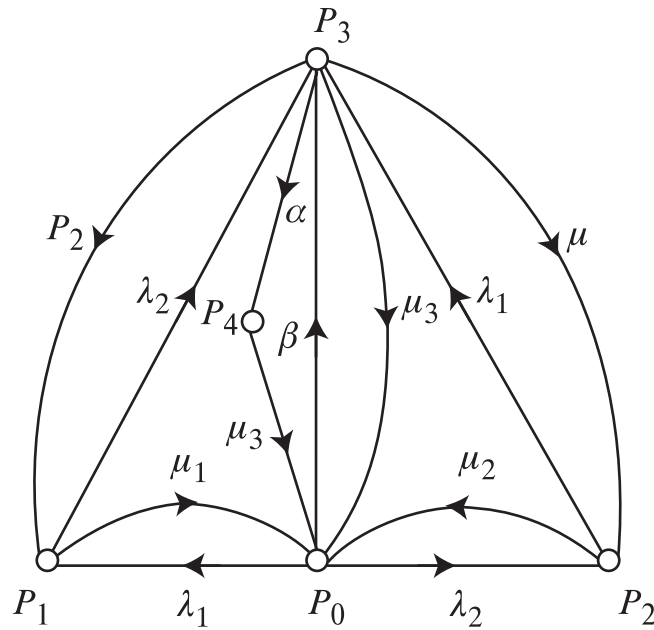


Рис. 4.5.22. Модель готовности системы в случае множественных отказов

$$\begin{aligned}
 P'_0(t) &= -\left(\sum_{i=1}^2 \lambda_i + \beta\right) P_0(t) + \sum_{i=1}^3 P_i(t) \mu_i + P_4(t) \mu_3, \\
 P'_1(t) &= -(\lambda_2 + \mu_1) P_1(t) + P_3(t) \mu_2 + P_0(t) \lambda_1, \\
 P'_2(t) &= -(\lambda_1 + \mu_2) P_2(t) + P_0(t) \lambda_2 + P_3(t) \mu_1, \\
 P'_3(t) &= -\left(\sum_{i=1}^3 \mu_i + \alpha\right) P_3(t) + \sum_{i=1}^2 P_i(t) \lambda_{(3-i)} + P_0(t) \beta, \\
 P'_4(t) &= -\mu_3 P_4(t) + P_3(t) \alpha.
 \end{aligned} \tag{4.5.44}$$

При $t = 0$ имеем $P_0(0) = 1$, а другие вероятности равны нулю.

Приравняв в полученных уравнениях производные по времени нулю, для установившегося режима получаем:

$$\begin{aligned}
 &-\left(\sum_{i=1}^2 \lambda_i + \beta\right) P_0 + \sum_{i=1}^3 P_i \mu_i + P_4 \mu_3 = 0, \\
 &-(\lambda_2 + \mu_1) P_1 + P_3 \mu_2 + P_0 \lambda_1 = 0, \\
 &-(\lambda_1 + \mu_2) P_2 + P_0 \lambda_2 + P_3 \mu_1 = 0, \\
 &-\left(\sum_{i=1}^3 \mu_i + \alpha\right) P_3 + \sum_{i=1}^2 P_i \lambda_{(3-i)} + P_0 \beta = 0, \\
 &-\mu_3 P_4 + P_3 \alpha = 0, \\
 &\sum_{i=0}^4 P_i - 1 = 0.
 \end{aligned} \tag{4.5.45}$$

Решая эту совместную систему уравнений, получаем:

$$P_0 = \left[\theta \left\{ 1 + \frac{\mu_1(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)} + \frac{\lambda_2 + \mu_1}{\mu_2} + \frac{\alpha(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2\mu_3} \right\} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2} - \frac{\mu_1\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_2)\mu_2} - \frac{\lambda_1}{\mu_2} - \frac{\alpha\lambda_1}{\mu_2\mu_3} + 1 \right]^{-1}, \quad (4.5.46)$$

где $\theta = \frac{P_1}{P_0}$,

$$(P_1 / P_0) = \left[\frac{\lambda_1\mu_3 + \alpha\lambda_1}{\mu_2} - \left(\frac{\mu_2\lambda_2}{\lambda_1 + \mu_3} \right) + \left(\frac{\mu_1\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_3} \right) + \lambda_1 + \lambda_2 + \beta \right] \times \times \left[\frac{\mu_3(\lambda_2 + \mu_1) + \alpha(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2} + \frac{\mu_1(\lambda_2 + \mu_1)}{(\lambda_1 + \mu_2)} + \mu_1 \right]^{-1}, \quad (4.5.47)$$

$$P_1 = \theta P_0,$$

$$P_2 = \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2} - \frac{\mu_1\lambda_1}{\mu_2(\lambda_1 + \mu_2)} \right] P_0 + \frac{\mu_1(\lambda_2 + \mu_1)P_1}{\mu_2(\lambda_1 + \mu_2)},$$

$$P_3 = \frac{(\lambda_2 + \mu_1)P_1}{\mu_2} - \frac{\lambda_1 P_0}{\mu_2},$$

$$P_3 = \frac{\alpha P_1(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2\mu_3} - \frac{\alpha\lambda_1}{\mu_2\mu_3} P_0.$$

Стационарный коэффициент готовности может быть вычислен по формуле:

$$K_e = \sum_{i=0}^2 P_i.$$

Г Л А В А 5

Методика исследования надежности технических систем

5.1. Системный подход к анализу возможных отказов: понятие, назначение, цели и этапы, порядок, границы исследования

С позиций безопасности системный подход к анализу возможных отказов состоит в том, чтобы увидеть, как части системы функционируют во взаимодействии с другими ее частями.

Системный анализ — методология исследования любых объектов посредством представления их в качестве отдельных элементов и анализа этих элементов; применяется для:

- выявления и четкого формулирования проблемы в условиях неопределенности;
- выбора стратегии исследования и разработок;
- точного определения систем (границ, входов, выходов, связей), выявления целей развития и функционирования системы;
- выявление функций и состава вновь создаваемой системы.

Системы являются сложными, многоуровневыми и многокомпонентными образованиями. В целях адекватной информации и определения причинных связей элементы системы конкретизируются. Такой подход позволяет однозначно определить опасности и опасные состояния системы. Он обеспечивается *декомпозицией систем* — расчленением иерархии и организации системы на взаимосвязанные составные части (подсистемы, элементы), последующим исследованием их независимо друг от друга и координацией локальных решений. Этот метод представляет, по существу, разложение сложных систем на простые с применением теорем об условных вероятностях и условных распределениях. При этом вначале вычисляются показатели надежности более простых подсистем, а затем полученные результаты группируются с целью получения характеристик всей системы

в целом. Рассматриваемый метод может быть использован для упрощения, как пространства состояний, так и конфигурации системы. Эффективность метода зависит от выбора ведущего элемента, т.е. элемента, используемого при декомпозиции системы. Если этот элемент выбран неудачно, то, несмотря на идентичность конечного результата, вычисления окажутся значительно более громоздкими. В случае сравнительно сложных систем правильный выбор главных элементов для создания простой конфигурации может оказаться сложной задачей.

Трудности, возникающие при рассмотрении сложных систем, можно уменьшить, используя **метод преобразования**. Он состоит в последовательном упрощении систем с последовательным и параллельным соединением элементов путем преобразования их в эквивалентные схемы. Подобная процедура выполняется до тех пор, пока вся система не будет сведена к одному-двум элементам. При этом обычно делается допущение о независимости отказов. Основное преимущество данного метода заключается в его простоте и доступности, однако он не приемлем при наличии постепенных отказов.

Анализом возможных отказов системы или ее элементов называют оценку влияния возможных отказов элементов следующего уровня структуры на выходные характеристики исследуемого объекта и определение перечня возможных отказов. **Возможным отказом** системы называется состояние, в которое может перейти система за время эксплуатации при возникновении отказов входящих в него элементов следующего уровня структуры. Совокупность возможных отказов называют **перечнем возможных отказов**.

Анализ возможных отказов проводят с целью выявления возможных причин их возникновения, оценки вероятности возникновения, времени возникновения, выбора методов обнаружения и регистрации, определения последствий отдельных видов отказов и разработки предупредительных, контрольных и защитных мероприятий по обеспечению надежности и безопасности на стадиях эксплуатации и проектирования систем.

В зависимости от сложности системы анализ возможных отказов проводят с использованием различных источников информации — конструкторской документации и схем эксплуатации, карт технологических процессов, опыта создания и эксплуатации систем-аналогов, циклограмм функционирования, результатов статистической обработки измерений входных и выходных параметров и др.

Анализ возможных отказов предусматривает следующие этапы:

- анализ процесса эксплуатации системы и составление перечня периодов эксплуатации;
- задание границ рассмотрения системы;
- рассмотрение взаимодействия и взаимовлияния составных частей (элементов) системы;
- назначение контролируемых параметров и систем контроля;
- определение характерных признаков отказов и их симптомов;

- составление перечня возможных отказов для каждого периода эксплуатации;
- оценку вероятностных и временных характеристик каждого вида отказов из перечня возможных отказов;
- анализ критичности отказов и ранжирование отказов по важности;
- определение возможных последствий отказов, возможности их обнаружения и устранения (или уменьшения степени опасности).

Анализ должен удовлетворять следующим требованиям, выполнение которых в значительной мере повышает качество проводимых исследований:

- проводиться с достаточной степенью полноты и детализации;
- учитывать физическую природу процессов, протекающих в системе;
- учитывать влияние взаимных отказов, различные режимы работы элементов системы, возможные отказы между элементами (отказы межсистемных связей и соединений);
- обеспечивать согласованность параметров элементов системы.

Анализ процесса эксплуатации системы позволяет получить необходимые сведения для выявления возможных отказов. Его проводят в следующем порядке:

- определяют назначение системы, особенности условий и режимов эксплуатации и перечень выполняемых задач;
- выделяют основные, обеспечивающие и вспомогательные функции;
- для каждой выявленной функции определяют взаимно однозначные группы статистически независимых выходных параметров, номинальные и предельно допустимые значения каждого параметра;
- определяют виды элементов системы, их функциональные особенности и характер взаимодействия при эксплуатации, наличие резервных элементов, выявляют элементы, не имеющие аналогов;
- определяют условия эксплуатации (основные и резервные режимы работы, возможности работы с измененными выходными параметрами и др.);
- определяют продолжительность каждого периода эксплуатации.

Составление перечня возможных отказов. Он должен обладать достаточной полнотой, определяемой наличием наиболее вероятных и критичных (приводящих к наиболее тяжелым последствиям) отказов, но **не может быть избыточным** из-за включения в него зависимых отказов. Отказы, возникающие по одной и той же причине, могут быть объединены.

Общее число возможных отказов в перечне складывается из общего числа всех выделенных условно независимых параметров по каждой функции системы с учетом возможного числа нарушений предельно допустимых значений по каждому параметру.

При составлении перечня анализируют также ограничения на условия применения изделия, нарушения которых рассматривают как возможные отказы. Далее уточняют перечень при проведении анализа причин, оценке вероятностей возникновения, возможностей обнаружения отказов и их

последствий. Перечни возможных отказов и их причин оформляются в виде отчетов.

Методические основы задания границ системы при анализе опасных состояний и отказов состоят в следующем. Только **главные, наиболее вероятные или критические события должны рассматриваться на начальной стадии анализа**. Для определения этих событий можно использовать анализ критичности. По мере продвижения исследовательской работы (экспертизы) можно включать все более редкие или менее вероятные события или предпочесть не принимать их в расчет.

В принципе окружающие условия — это весь мир, в котором находится данная система. Таким образом, чтобы не отклоняться от намеченной цели, **необходимо установить разумные пределы влияния окружающей среды при проведении исследования** с помощью дерева событий или отказов, поскольку эти два подхода предусматривают детальную разработку процесса развития начальных аварийных событий в системе и окружающей ее среде.

При определении границ системы требуется тщательно установить начальные состояния элементов. Все элементы, которые имеют более одного рабочего состояния, создают различные начальные условия. Например, начальное количество жидкости в баке может быть регламентировано. Событие «бак полный» становится одним начальным состоянием, а «бак пустой» является другим состоянием. **Необходимо также точно установить рабочий отрезок времени:** например, условия при пуске и остановке могут создавать другого рода опасные условия, отличающиеся от установившихся режимов работы.

Когда достаточное количество информации по системе собрано, можно составить описания вариантов развития процесса (сценариев) и определить конечные события. Затем **устанавливают причинные взаимосвязи**, ведущие к каждому конечному событию, например при помощи дерева отказа.

Обычно система изображается в виде блок-схемы, показывающей все функциональные (или причинные) взаимосвязи и элементы. При ее построении исключительно важную роль приобретает **правильное задание граничных условий**, которые **не следует путать с физическими границами системы**.

Одним из основных требований, предъявляемых к граничным условиям, **является задание завершающего (головного) нежелательного события**, установление которого требует особой тщательности, **поскольку именно для него как для основного отказа выполняется анализ**. Кроме того, чтобы проводимый анализ был понятен всем заинтересованным лицам, **исследователь обязан составить перечень всех допущений**, принимаемых при определении системы и построении порядка исследования.

Обычно для каждой системы строят несколько маршрутов развития завершающего (опасного) события. Впоследствии они могут быть и связаны, но на этапе анализа с ними работают отдельно. Аналогично, если система функционирует в различных режимах, то может потребоваться анализ развития опасных состояний для каждого из режимов.

Взаимосвязь элементов и топография системы. Система состоит из таких элементов, как единицы оборудования, материалы, персонала предприятия (необязательно, чтобы эти элементы были самыми мелкими элементами в системе; они могут быть блоками или целыми подсистемами), которые находятся в определенной окружающей среде и подвержены внешнему воздействию.

Опасные состояния вызываются одним или несколькими элементами, приводящими к отказам в системе. Окружающая среда, персонал, старение могут влиять на систему только через ее элементы (рис. 5.1).

Каждый элемент системы связан с другими элементами специфическим образом, а идентичные элементы могут иметь различные характеристики в различных системах. Поэтому необходимо уточнять взаимосвязи и топографию системы. Взаимосвязи и топографию определяют, например, путем изучения системы трубопроводов данного предприятия, электрических схем, механических соединений, потоков информации, а также физического расположения элементов. Эти связи наилучшим образом можно представить в виде различных схем системы; технических описаний системы, карт технологических потоков и др., которые оказываются полезными в данной работе.



Рис. 5.1. Воздействия и взаимосвязь элементов

Например, гидравлический удар, который вызывается быстрым закрытием клапана и который, в свою очередь, приводит к потере герметичности фланцевого соединения, выявляют при изучении схемы трубопроводов. Взаимовлияние двух расположенных емкостей возможно в случае пожара. Возможные изменения состояния элементов системы, возникающие в результате других причин, следует также включать в технические описания или в карты логических переходов.

Работа в подготовительный период. Объем подготовительной работы определяется сложностью системы. Работа состоит из четырех основных этапов:

- получение данных;
- обработка данных;
- планирование последовательности проведения исследований;
- организация обсуждений.

Как правило, данные включают различные чертежи и схемы (линейные схемы, карты технологического процесса, схемы размещения производственного оборудования и пр.), эксплуатационные инструкции, схемы последовательного контроля за работой приборов, логические схемы, программы для ЭВМ, иногда даже инструкции изготовителей и поставщиков по правилам эксплуатации оборудования.

Эти данные должны быть проверены для того, чтобы удостовериться в их пригодности для исследования и выявить в них все противоречия и неточности. Объем работы, необходимой для обработки данных и планирования последовательности проведения исследований, зависит от типа системы.

Руководитель группы разрабатывает план проведения исследования и обсуждает как метод, так и план исследования с членами группы до начала работы по выявлению опасностей.

5.2. Выявление основных опасностей на ранних стадиях проектирования

Желательно выявлять опасности крупных аварий, включая возможности взаимодействия между установками, которые могут иметь катастрофические последствия, на самой ранней стадии разработки проекта, что позволяет значительно облегчить дальнейшие исследования опасности и эксплуатационной пригодности на последующих стадиях проекта.

Главным требованием является выявление основных опасностей, которое может быть осуществлено после установления определенных общих параметров:

1. Материалы — сырье, исходные материалы, промежуточные материалы, продукция (продукты реакции), исходящие потоки газа или жидкости.
2. Производственные операции (технологический процесс).
3. Местоположение проектируемой системы — размещение между производственными операциями, пространственные соотношения с другими системами.

Эти общие параметры должны затем рассматриваться поочередно в процессе использования контрольных перечней потенциальных опасностей. Например, контрольные перечни, разработанные для обследования большинства технологических установок, включают следующие опасности: пожар, взрыв, детонацию, токсичность, коррозию, радиацию, шум, вибрацию, ядовитый (вредный) материал, поражение электротоком, механическое повреждение.

Для отдельных процессов можно дополнительно рассматривать и другие опасности.

Когда потенциальные опасности рассматриваются поочередно применительно к общим параметрам, любая значимая комбинация может служить

признаком большей опасности, которая затем должна рассматриваться в соответствии с перечнем принципиальных решений.

Приведем несколько примеров для иллюстрации процедуры.

Значимая комбинация параметров ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПРОДУКТА X и ПОЖАРА может показать, что пределы воспламеняемости вещества неизвестны и должны быть получены до того, как будет начато проектирование сушилки.

Значимая комбинация параметров ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА, ПОЖАРА и ХРАНЕНИЯ ЖИДКОГО АЗОТА может привести к перепланировке хранилища материалов.

Описанная процедура исследования может быть очень быстро выполнена небольшой группой опытных специалистов.

Такой подход с использованием контрольных перечней позволяет обеспечить сочетаемость различных установок на ранней стадии проектирования и может применяться для оценки взаимодействия между системами, а также между системой и окружающей средой.

Проверки с целью выявления значимых опасностей следует проводить при наличии достаточного количества времени для внесения принципиальных изменений в концепцию проекта. При проведении более детального исследования опасности и эксплуатационной готовности на более поздней стадии следует выявлять только менее значительные опасности, не требующие серьезных изменений методов работы для их устранения.

5.3. Исследования в предпусковой период

Проведение такого исследования целесообразно при следующих условиях, когда:

- 1) на очень поздней стадии проектирования произошло существенное изменение в назначении устройства;
- 2) инструкции по эксплуатации очень рискованные;
- 3) новая установка является копией существующей системы, в которую внесены изменения, касающиеся в основном технологического процесса, а не самой конструкции.

Необходимо убедиться в том, что схемы и технологические карты точно описывают построенную установку.

5.4. Исследования действующих систем

В то время как основное внимание уделяется новым системам, не следует упускать из виду потенциальную опасность установок, находящихся в эксплуатации.

Эти производственные системы могли находиться в непрерывной эксплуатации в течение многих лет, подвергаясь переделкам и модификациям в течение этого периода. Даже если такие модификации проводились очень тщательно, они могли привести к снижению запаса прочности или нарушению требований безопасности, предусмотренных первоначальным проектом.

Поскольку возможности и методы ограничены, поэтому при отборе установок к исследованию рекомендуется учитывать следующие факторы:

1. Проверка технической безопасности показала, что желательно провести более детальное исследование.
2. При обслуживании этих систем имели место опасные происшествия или несчастные случаи.
3. Эксплуатация показала, что данная система обладает высоким потенциалом опасности.
4. Система будет находиться в эксплуатации в течение долгого времени.
5. Система подвергалась значительным изменениям.
6. Удобно проводить обследование данной системы последовательно, совместно с другими взаимодействующими установками.

При организации исследования на существующей системе необходимо предусмотреть дополнительное время на проведение подготовительной работы, так как часто обнаруживается, что технологические схемы и инструкции по эксплуатации устарели.

На стадии модификации требуется бóльшая осторожность, чем обычно. Группа (бригада) разрабатывает рекомендации, предусматривающие возможность значительных изменений системы. Очень важно определить, кто будет нести ответственность за выполнение этих рекомендаций. Необходимо также установить эффективную форму контроля и оценки результатов. Обычно это предусмотрено в новых проектах, но может отсутствовать при модификации действующих систем.

5.5. Регистрация результатов исследования

Регистрация результатов исследования является важным аспектом работы исследовательской группы. Полезной формой регистрации является «Файл (картотека, архив) опасности». Он содержит копии:

- документов (карту технологического процесса, инструкции по эксплуатации, гистограммы, модели и т. д.), используемые при проведении совещаний экспертов с визой руководителя группы исследования о проведенной проверке;
- всех рабочих докладов, вопросов, рекомендаций, повторных проектов и перепланировок и т. д., явившихся результатом работы группы.

В файлы по безопасности могут вноситься изменения в случае:

- серьезных изменений в производственных технических системах или производственном процессе;
- появления новой информации об опасных веществах;
- значительных достижений в области техники безопасности.

Окончательные результаты исследования оформляются отчетом, который следует хранить на предприятии. Он является источником информации для экспертов при анализе опасностей и обслуживающего персонала при проведении текущих и последующих работ.

5.6. Содержание информационного отчета по безопасности процесса

5.6.1. Описание промышленной системы

- а) местность: планы местности, здания и предприятия, расположенные по соседству (фабрики, автомагистрали, здания, больницы, школы и т. п.);
- б) конструктивные особенности и используемые материалы;
- в) проектные параметры: давление, температура, объем, скорости потоков и др.;
- г) фундамент (его устойчивость);
- д) зоны безопасности (защита от взрыва, разделяющие расстояния);
- е) возможность доступа в производственные помещения предприятия: маршруты аварийной эвакуации персонала из производственных помещений, маршруты следования аварийно-спасательных команд;
- ж) схемы размещения контрольно-измерительных приборов и средств автоматической защиты.

5.6.2. Описание производственных процессов

- а) техническое назначение промышленной системы, схема или упрощенный чертеж потоков процесса;
- б) основные принципы технологических процессов: основные операции; физические и химические реакции; полезный объем хранилищ; выгрузка продукции; сбор, хранение, утилизация, обработка и полное уничтожение (захоронение) промышленных отходов; выпуск или очистка отработанных газов, технологической воды;
- в) условия производственного процесса: описание процесса и данные по безопасности (давление, температура) для отдельных стадий процесса; допустимые пределы температуры, давления, расхода веществ;
- г) описание технологических характеристик процесса: эти данные лучше всего представлять на соответствующих графиках схемы потока, они должны содержать информацию о: компонентах процесса; различных видах энергопитания; характеристиках рабочих режимов; размере (объеме) сосу-

дов и трубопроводов, содержащих опасные вещества; системах контроля давления;

д) энергопитание: здесь следует описать все виды энергопитания, применяемые для обеспечения безопасности (электрический ток, охладители, сжатый воздух, инертный газ), а в случае необходимости — и аварийные коммуникации;

е) проект систем вентиляции и пожаротушения;

ж) стандарты и правила, которыми руководствовались при проектировании.

5.6.3. Описание опасных веществ

а) вещества: стадия процесса, на которой находятся или могут находиться вещества; количество вещества; данные о веществах (физические и химические свойства); данные, имеющие отношение к безопасности (взрывоопасный предел, точка воспламенения, термоустойчивость, коррозионные свойства, тепловая и химическая стабильность, опасные эффекты возможного непреднамеренного смешивания различных веществ); токсикологические данные (токсичность, различные воздействия на организм человека, уровень запаха); пороговые значения (величины пороговых пределов, смертельные концентрации);

б) форма состояния веществ: состояние, в котором находится вещество или в которое оно может перейти в случае нарушения нормального режима работы установки.

5.6.4. Предварительный анализ опасностей

На основе описания производственного процесса, используемых или образующихся опасных веществ, состояний системы (установки) можно выделить опасности и определить важность тех или иных мер безопасности (человеческих или технических). Это можно выполнить, следуя методике, описанной в следующих главах.

В результате предварительного анализа опасностей составляется список элементов (оборудование, свойства, обеспечивающие безопасность, и различные производственные процессы), которые могут иметь отношение к производственной аварии. Их называют **«элементами системы безопасности»**.

5.6.5. Описание элементов системы безопасности

Выявленные в процессе предварительного анализа опасностей элементы, обеспечивающие безопасность, необходимо описать более подробно с тем, чтобы провести оценку возможности возникновения опасностей и развития крупных производственных аварий. Требуются следующие данные:

а) функция по назначению;

- б) тип нагрузки и ее величина;
- в) важность в обеспечении безопасности;
- г) специальные конструктивные критерии;
- д) органы управления системой и средства аварийной сигнализации;
- е) системы сброса давления;
- ж) коллекторные сборники;
- з) системы противопожарной защиты.

5.6.6. Оценка возможности развития опасностей

На основе видов и характеристик опасностей, выявленных путем выполнения предварительного анализа, а также использования информации о промышленной установке из отчета по безопасности можно выполнить оценку развития опасности в технической системе. Для проведения такой оценки следует пользоваться информацией о методах, содержащихся в соответствующих разделах настоящего пособия.

В качестве дополнительной информации в оценку опасностей должны входить сведения об известных случаях отказов аналогичных систем и аварий, имеющих место как на данном предприятии, так и любом другом аналогичном производстве.

Рекомендуется, чтобы в отношении элементов системы безопасности использовался анализ опасностей и опасных производственных процессов, документация по которому может включаться в отчет по безопасности.

В тех случаях, когда оценка ведет к выявлению особо чувствительных свойств элементов системы безопасности (предохранительных приспособлений, контрольной аппаратуры или действий работающего персонала), необходимо учитывать надежность этих свойств. При этом выявляется достаточность мер, принятых для того, чтобы избежать аварии. В противном случае выявленные особо чувствительные элементы системы безопасности следует усовершенствовать и таким образом повысить их надежность.

5.6.7. Организация

Организационные мероприятия, использующиеся для обеспечения безопасной работы технической системы и в целом предприятия, являются важным фактором, учитываемым в общей оценке безопасности. К ним относится информация по следующим вопросам:

- а) графики технического обслуживания и инспекций;
- б) руководства по обучению персонала;
- в) распределение ответственности за безопасность технических систем и предприятия;
- г) реализация процедур, обеспечивающих безопасность.

5.6.8. Оценка последствий крупных производственных аварий

Оценка производственных опасностей считается законченной, если известны возможные последствия аварии. По этой причине последняя ступень оценки опасностей заключается в анализе последствий, которые могут иметь место в результате крупной аварии, как для всего предприятия, так и для работающих, населения, живущего в его окрестностях, и окружающей среды. Результаты этого анализа используются для разработки плана защитных мер, обеспечения работы противопожарных служб, аварийных и защитных систем.

Если части 5.6.1—5.6.7 отчета касаются технических и организационных мер безопасности, то эта его часть содержит:

- а) описание аварии (например, разрушение стенок или трубопровода, выход из строя предохранительного клапана, пожар и т. д.);
- б) оценка возможных утечек (выбросов) опасных веществ или энергии (в результате взрыва);
- в) сведения о количестве выброшенного вещества (токсичного, воспламеняющегося, взрывоопасного);
- г) расчет дисперсии вещества выброса (газа или испаряющейся жидкости);
- д) оценка эффекта (токсичное воздействие, тепловыделения, взрывная волна);
- ж) оценка эффектов выбросов или взрывов (размеры пораженных площадей, воздействия на здоровье людей, размер материального ущерба).

В помощь таким оценкам предлагаются уже разработанные модели, описанные в литературе, касающейся анализа риска, защиты и действиям в чрезвычайных ситуациях.

5.6.9. Планирование мер смягчения последствий аварий

Ни одна из промышленных установок, относящихся к аварийно-опасным производствам, не может быть абсолютно безопасной. Исключить полностью вероятность аварии невозможно, даже если была проведена тщательная оценка опасностей и были приняты соответствующие меры безопасности.

По этой причине неотъемлемой частью понятия безопасности должно стать планирование и обеспечение на практике мер смягчения последствий аварии.

Другие меры смягчения последствий аварии касаются прежде всего реагирования на выброс опасных веществ. Чтобы иметь возможность предпринимать контрмеры в аварийной ситуации, руководству предприятия может потребоваться:

- а) подобрать и обучить пожарную и аварийно-спасательную команду;
- б) установить систему аварийной сигнализации с прямой связью с вышеупомянутой командой или другими аварийными службами;

в) составить план действий в чрезвычайных (аварийных) обстоятельствах, который должен содержать:

- организационную систему действий в случае аварии;
- каналы связи и аварийной сигнализации;
- руководящие указания по борьбе с аварией;
- информацию об опасных веществах;
- примеры возможной последовательности обстоятельств аварии;

г) достигнуть соглашения с комитетом по чрезвычайным ситуациям для координации своих мер с их планом действий в чрезвычайных обстоятельствах;

д) уведомить власти о характере и степени опасности в случае аварии;

е) обеспечить противоядие в случае выброса токсичных веществ (несмотря на то, что это требование будет выполняться, скорее всего, местными медицинскими службами).

Все перечисленные меры должны быть применимы к выявленным в результате исследований опасностям и проводиться заранее проинструктированным и обученным работающим персоналом во взаимодействии с силами быстрого реагирования в чрезвычайных ситуациях и ответственными представителями местных властей.

План действий в чрезвычайных обстоятельствах может стать эффективным только при условии правильного инструктажа и проведения программы учебной тревоги, максимально приближенной к условиям реальной аварии.

5.6.10. Отчеты перед местными органами власти

Администрация опасных производств так или иначе обязана отчитываться о состоянии безопасности труда на своих предприятиях. Отчеты включают:

- информацию о промышленных установках, на которых могут произойти крупные аварии;
- описание технических мероприятий по безопасности;
- описание организационных мероприятий, направленных на обеспечение безопасной работы предприятия;
- описание серьезных отклонений от нормальных режимов работы и действенности аварийно-спасательных мер;
- немедленное уведомление властей о произошедшем несчастном случае (аварии).

Отнесение производства к опасному зависит от типов и количества используемых, хранящихся или изготавливаемых опасных веществ. Уведомление властей о наличии на подведомственной им территории опасных химических веществ в количествах, превышающих безопасный уровень, необходимо для обеспечения дополнительного контроля за их безопасным хранением и использованием.

Описание действующих технических систем дает соответствующим органам возможность:

- проверять соответствие установки требованиям стандартов по безопасности при выдаче разрешений на работу конкретных предприятий;
- проводить специальные инспекции с целью выявления опасностей, присущих этим промышленным установкам;
- определить характер и масштаб использования веществ на данном предприятии;
- принимать верные решения в отношении размещения новых предприятий, транспортных коммуникаций и жилых районов;
- разрабатывать планы мероприятий в чрезвычайных обстоятельствах;
- определить тип, относительную вероятность и последствия крупных аварий, которые могут иметь место;
- показать, что администрация установила потенциал опасности крупной аварии и приняла необходимые меры предосторожности.

Г Л А В А 6

Инженерные методы исследования безопасности технических систем

6.1. Понятие и методология качественного и количественного анализов опасностей и выявления отказов систем

Безопасность — проблема многоплановая, которая должна быть разрешена известными способами до того, как отсутствие правильного решения приведет к профессиональному заболеванию, несчастному случаю или аварии.

Первый шаг к ликвидации опасностей состоит в их выявлении, т. е. идентификации. Инженер обязан уметь это делать. Он должен определить потенциальные источники опасности, которые могли и не вызвать аварий до сих пор; выявить опасности, которые маловероятны, но которые могут привести к серьезным последствиям; устранить из рассмотрения опасности, которые практически неосуществимы.

Оценивание каждой опасности включает изучение вероятности ее появления, а также серьезности травм персонала, повреждений систем, зданий и прочих компонентов производства, а также экологического ущерба, к которым может привести авария. Опасности должны быть сравнимы, это необходимо для их ранжирования. Для успешного анализа опасностей необходимо провести и изучение контрмер по отношению к каждой из опасностей, что добавляет еще одно направление при проведении анализа, так как в последующем принимаемые решения будут связаны с компромиссами среди альтернативных решений.

Чтобы способы обеспечения безопасности стали реальностью, необходимо использовать определенные процедуры или отдельные действия:

- идентификация опасностей, их анализ и оценка;
- логические процедуры формулирования предупредительных мероприятий (контрмер);
- выбор лучшей контрмеры для внедрения (принятие решения).

Проблема безопасности решается выбором метода, который дает более выгодное решение при несовершенных исходных данных.

Методы анализа основаны на качественном и количественном подходах к оценке опасностей.

Качественный анализ системы, как правило, предшествует количественному. Например, измерениям должна предшествовать стадия идентификации опасностей, выполняемая только на основе качественного анализа опасностей, который ведется просмотром изучаемой системы. Задача — выделить проблемы безопасности, нуждающиеся в более подробном рассмотрении. В любых отраслях промышленности можно выявить источники повышенной опасности или (и) ненадежные компоненты эксплуатируемой системы.

В технике и технологиях встречаются разнообразные опасности и если они характеризуются высокими температурами, большими скоростями и давлениями, то опасные точки обнаружить относительно просто. Чаще это достигается качественным анализом.

Кроме идентификации опасностей, качественная оценка существенна и при выборе альтернативных средств усовершенствования системы для ликвидации опасностей и достижения безопасности, а в проектируемых системах это выразится в форме разработки альтернатив для выполнения требований, предъявляемых к системе, необходимых инструкций и организационных мероприятий и прочих мер, определяемых принципами и методами обеспечения безопасности. Обилие возможностей при выборе контрмер безопасности также обуславливает применение качественного анализа.

Качественные оценки ведутся по более грубой шкале, чем количественные, поскольку человек не может учесть более четырех — пяти факторов одновременно в одной задаче.

Качественные методы анализа допускают использование полуколичественных оценок (больше, меньше), определенное ранжирование, например, по частоте встречающихся событий (никогда, редко, часто) или по сумме ущерба от аварий.

При качественном анализе используются специальные формы, технические стандарты и утвержденные нормы безопасности. Его результаты приводят к последующим задачам оптимизации, осуществляемым количественными методами.

Количественные методы анализа эффективны при сравнении сопоставимых опасностей системы в конкретном интервале времени. Недостаточная эффективность в других случаях объясняется тем, что неизвестно будущее состояние системы. Однако это не исключает количественных методов для оценки и прогнозирования состояния системы.

Количественные методы эффективны по следующим причинам:

- оценки будущих характеристик системы могут выполняться по характеристикам компонентов системы. Оценки на этом уровне более точны, а их погрешности меньше влияют на результат;

- оценки могут выполняться различными лицами, так что для каждого вида оценок может быть привлечен наиболее квалифицированный специалист;
- оценки могут осуществляться методом последовательного приближения, причем при каждом пересчете можно изучать влияние изменения исходных данных.

Применение количественных методов анализа требует в первую очередь выбора группы критериев или отдельного критерия, определенного как мера для сравнения количественных показателей исследуемой операции в отношении затрачиваемых усилий и получаемых результатов.

Критерий должен отвечать следующим основным требованиям:

- иметь ясный физический смысл;
- быть определяющим и соответствовать основной цели функционирования системы, подсистемы или элемента;
- учитывать основные детерминированные и стохастические факторы, определяющие уровень безопасности системы;
- быть критичным к анализируемым параметрам и достаточно чувствительным к ним.

Классификация критериев включает:

А. Общие (интегральные) критерии, дающие наиболее полную оценку совершенствования системы (общее число возможных аварий и случаев травматизма, сумма затрат на создание системы безопасности).

Б. Условные (косвенные) критерии, отражающие одно из свойств системы путем отнесения его к некоторому показателю (стоимость получения единицы конечной продукции, вероятность безотказной работы определенного комплекса защитных мер, вероятность возникновения аварийной ситуации в определенном промежутке времени).

В. Относительные (нормированные) критерии, характеризующие безопасность системы в отношении оснащенности и эффективности средств защиты (отношение времени воздействия опасного фактора к общему времени работы, сопоставление экономической эффективности внедрения различных средств защиты, изменение уровня безопасности по сравнению с внедрением).

Количественный анализ возможен на основе методов объективного измерения и прогнозирования последствий опасности.

При проведении количественного анализа необходимо оценивать полноту и достоверность исходных данных, адекватность и точность используемых схем, обоснованность принимаемых допущений и зависимость от них получаемых рекомендаций и выводов.

При выборе окончательных решений необходимо проводить оценку гарантий, обеспечиваемых количественным анализом, а также рассматривать возможное повышение этих гарантий, применяя технические критерии, нормы и правила, позволяющие в совокупности обеспечить требуемую высокую надежность и безаварийность техники.

По результатам количественного анализа могут быть проведены корректирование перечня возможных отказов и ранжирование причин отказов систем. В перечень вводятся критические виды отказов, которые имеют наибольшую вероятность появления, а также отказы, анализ которых затруднен.

Методы анализа, основанные на качественном и количественном подходах и применяемые на различных стадиях проектирования и эксплуатации технологического оборудования, существенно зависят от целей анализа. При этом элементы одних методов могут быть использованы для усиленной реализации других методов. Так, например, метод «дерева отказов» может быть использован на этапах проектирования и эксплуатации как для качественного, так и для количественного анализа безопасности системы.

Учитывая вышеизложенное, трудно дать строгую классификацию этих методов. Поэтому будем придерживаться следующей схемы. Вначале рассмотрим методы идентификации опасностей (предварительный анализ опасностей — *ПАО*), а затем детальный анализ.

6.2. Порядок определения причин отказов и нахождения аварийного события при анализе состояния системы

Причины каждого из возможных отказов определяют дополняющими друг друга методами анализа. Имеется два подхода при анализе причинных связей: *прямой анализ* и *анализ с обратным порядком*.

Анализ с прямым порядком начинается с определения перечня отказов и развивается в прямом направлении с определением последствий этих событий («*снизу вверх*»).

Анализ с обратным порядком начинается с определения опасного состояния системы, от которого в обратном направлении прослеживаются возможные причины возникновения этого состояния (развивается «*сверху вниз*»).

При построении дерева событий (*ДС*), проведении анализа вида и последствий отказа (*АВПО*), анализа критичности (*АК*) используется прямой порядок. Обратный — для анализа с помощью деревьев отказов (*ДО*). Для предварительного анализа опасностей (*ПАО*) используется как прямой подход, так и обратный. Такое комбинированное использование обоих подходов необходимо, чтобы полностью решить задачу анализа риска и надежности систем.

При выполнении анализа в прямом порядке принимается ряд определенных последовательностей событий и составляются соответствующие этим последствиям сценарии, оканчивающиеся опасными состояниями системы. При этом задается вопрос: к какому событию в процессе работы системы (ее элементов) приводит отказ элемента следующего уровня системы, например: «*Что случится, если разорвется трубопровод системы охлаждения реактора?*» При анализе с прямой последовательностью оказываются

полезными контрольные перечни возможных состояний элементов. Информация, которая должна быть собрана и обработана для рассмотрения ситуации (сценария), состоит из сведений по взаимосвязи элементов и топографии системы, а также включает данные по отказам элементов и другим детальным характеристикам системы. Эти сведения будут полезны и для построения дерева отказов.

Обратный подход, т. е. анализ с помощью дерева отказов, используется при определении причинных связей, ведущих к данному опасному состоянию системы. Само опасное состояние становится конечным событием дерева отказов. При этом задается вопрос: по каким причинам может произойти отказ системы, например: **«Каким образом может отказать электропитание насоса, подающего охлаждающую жидкость в систему охлаждения реактора?»** Данное конкретное конечное событие является лишь одним из многих возможных опасных состояний системы, представляющих интерес для анализа; **ДО** само по себе не выявляет возможных опасных событий в системе. Большие системы могут иметь много самых различных конечных событий и соответствующих им деревьев отказов.

Прямая логика часто называется **индуктивной**; логика, используемая при обратном порядке анализа систем, называется **дедуктивной**.

6.3. Предварительный анализ опасностей

Целью предварительного анализа опасностей (**ПАО**) является определение системы, части системы (оборудование, резервуары, продуктопроводы и т. п.); или отдельного элемента, топографии и выявление в общих чертах потенциальных опасностей или отдельных опасных состояний (перегрузка, разгерметизация, утечка, потеря устойчивости или несущей способности и т. д.), которые могут привести к опасным событиям, т. е. определение участка системы, где требуется более подробный анализ.

Следуя энергоэнтропийной концепции опасностей, риск будет связан с бесконтрольным освобождением энергии или утечками токсических веществ. Поскольку одни части системы (предприятия, производства и т. д.) представляют бóльшую опасность, чем другие, поэтому в самом начале анализа следует разбить предприятие (технологическую линию, технологический процесс и т. п.) на подсистемы, для того чтобы выполнить предварительный анализ опасностей в следующей логической последовательности:

Шаг 1. Определение потенциальных источников опасностей — системы, части системы или элементы, которые могут вызвать опасности (энергетические установки, трубопроводы, химические реакторы, емкости, сосуды под давлением, новые технологии и др.).

Шаг 2. Выявление опасностей — возможные пожары, взрывы, утечки токсичных веществ и т. д., которые маловероятны и еще не приводили к авариям.

Шаг 3. Введение ограничения на анализ — исключение из списка опасностей, проявление которых неосуществимо, или части системы, в которых осуществление опасностей практически невозможно.

Процедура *ПАО* нередко включает в себя не только предварительное выявление элементов системы или событий, которые ведут к опасным ситуациям — задачи анализа расширяются с использованием количественных (формализованных) приемов сравнения, включением в рассмотрение последовательности событий, превращающих опасности в происшествия, а также корректирующих мероприятий (контрмер) для устранения опасности.

Таким образом, результатом *ПАО* будут: перечень опасностей, место или элемент системы и корректирующие воздействия. На этой основе в дальнейшем разворачивается детальный количественный анализ. Другими словами, выявляются приоритеты и виды опасностей, которые следует рассматривать более подробно.

Структура качественного исследования при *ПАО* выглядит следующим образом.

1. Система, подсистема или элемент — аппаратура, механизм или функциональный элемент, технологические операции, подвергаемые анализу.
2. Ситуация — соответствующая фаза работы аппаратуры, механизма, элемента или вид технологической операции.
3. Опасный элемент — анализируемый элемент аппаратуры, механизма или технологическая операция, являющиеся по своей природе опасными.
4. Причина, вызывающая опасное состояние, — нежелательное событие или ошибка, которые могут быть причиной того, что опасный элемент вызовет определенное опасное состояние.
5. Опасные условия — результат взаимодействия элементов в системе и система в целом, при котором может быть создано опасное состояние.
6. Событие, вызывающее опасные условия, — нежелательные события или дефекты, которые могут вызвать опасное состояние, ведущее к определенному типу возможной аварии.
7. Потенциальная авария. Рассматривается любая возможная авария, которая возникает в результате определенного опасного состояния.
8. Последствия. Рассматриваются возможные последствия потенциальной аварии в случае ее возникновения.
9. Класс опасности. Выполняется качественная оценка потенциальных последствий для каждого опасного состояния в соответствии со следующими критериями:

Класс I — безопасный. Состояние, связанное с ошибками персонала, недостатками конструкции или ее несоответствием проекту, а также неправильной работой, которое не приводит к существенным нарушениям и не вызывает повреждения оборудования и несчастных случаев с людьми.

Класс II — граничный (предельно допустимый): состояние, связанное с ошибками персонала, недостатками конструкции, ее неправильным функ-

ционированием или несоответствием проекту, которое приводит к нарушениям в работе, но может быть компенсировано или взято под контроль без повреждений оборудования или несчастных случаев с персоналом.

Класс III — критический: состояние, связанное с ошибками персонала, недостатками конструкции или несоответствием проекту, а также неправильным ее функционированием, приводящее к существенным нарушениям в работе, повреждению оборудования и создающее опасную ситуацию, требующую немедленных мер по спасению персонала и оборудования.

Класс IV — катастрофический: состояние, связанное с ошибками персонала, недостаткам конструкции или ее несоответствием проекту, а также неправильным ее функционированием, полностью нарушающее работу и приводящее к последующему разрушению системы и (или) гибели или массовому травмированию персонала.

10. Мероприятия для предотвращения аварии. Рекомендуемые защитные меры для исключения или ограничения выявленных опасных состояний и (или) потенциальных аварий — требования к элементам конструкций, введение защитных приспособлений, изменение конструкций, введение инструкций для персонала и др. меры.

Результаты качественного анализа при проведении *ПАО* заносятся в таблицу. Содержание этой формы носит описательный характер с перечислением как отдельных событий, так и вводимых корректирующих действий, которые могут быть предприняты. По усмотрению исследователя пункты таблицы могут соответствовать приведенной структуре или несколько изменяться — все зависит от поставленных задач, рассматриваемой системы и условий окружающей среды.

6.4. Метод анализа опасности и работоспособности— AOP (Hazard and Operability Study — HAZOP)

На основе этого метода (в ряде работ он именуется как «Метод изучения опасностей и функционирования», «Метод последовательной экспертизы», «Метод ключевых слов») возможно предсказание отдельных условий, приводящих к реализации опасностей. Он предназначен для рациональной организации функционирования производства и предотвращения несчастных случаев. По своей сути — это исследование, выполняемое на основе применения в соответствии с эвристическими правилами ключевых терминов для выявления всех отклонений (опасных состояний) в работе системы от нормы, и описание возможных последствий обнаруженных отклонений для безопасности функционирования, а также вероятных причин этих отклонений и действий, необходимых для безопасного поддержания процесса. Метод не только обнаруживает недостатки и опасные состояния, но и является конструктивным, так как позволяет провести (в случае необходимости) усовершенствование или радикальную модификацию системы (установки).

Однако он позволяет исследовать влияние отдельных отклонений технологических параметров (температуры, давления, расхода вещества и др.) от регламентных режимов с точки зрения возникновения опасности. Этот метод по качеству и сложности соответствует **АВПО** и анализу критичности.

Процедура реализации метода заключается в изучении каждой составляющей технологической схемы (линии, блока и т. д.). Конструктивное решение такой составляющей анализируется в том виде, в котором оно представлено в проектной документации. Затем набор ключевых терминов и слов «применяется» к этой составляющей и анализируются «сгенерированные» последствия.

Примером может служить следующий набор: **Не, Нет, Больше, Меньше, Помимо, Скорее чем, Позже чем, Наоборот, Также как, Чем другие, Часть из, Ни один из, Больше чем, Меньше чем, Часть чего-либо** и др. Они направляют и стимулируют процесс творческого мышления на выявление отклонений и позволяют проследить порядок развития (динамику) опасности.

ПРИМЕР. Продемонстрируем принципы проведения **ПАО** с использованием ключевых слов на примере установки, в которой происходит реакция между химическими веществами **А** и **В** с получением продукта **С**.

Процесс может осуществляться различными способами, и его ход обычно представляется в описательной или графической формах. Чаще всего он изображается в виде схемы (рис. 6.1) или карты технологического процесса. В рассматриваемом примере предусмотренные проектом характеристики производственного процесса частично описаны в технологической карте и частично отражены в требовании управления технологическим процессом, определяющим подачу вещества **А** при какой-то заданной скорости.

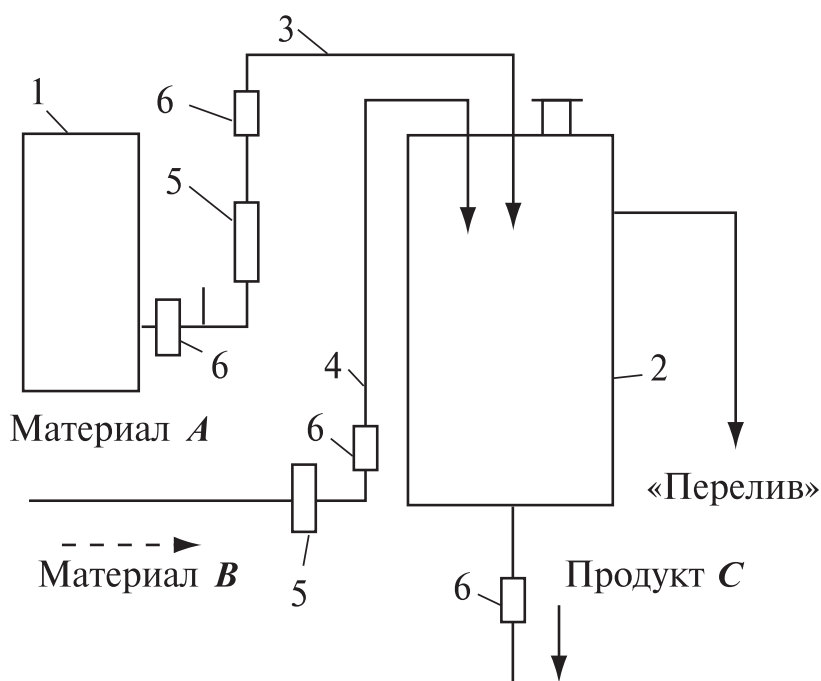


Рис. 6.1. Схема технологической установки:

1 — расходная емкость; 2 — реактор; 3, 4 — трубопроводы продуктов **А** и **В**;
5 — насосы; 6 — запорный клапан

Пример простой технологической карты

1. Вещество *A*.
2. Вещество *B*.
3. Получаемый продукт *C*.
4. Реакция $A + B = C$.

Предположим, что химия технологического процесса такова, что концентрация исходного материала *A* никогда не должна быть ниже концентрации материала *B* во избежание взрыва.

Проектом определено, как должен работать участок трубопровода, по которому осуществляется перемещение материала *A*.

Первое из появляющихся отклонений возникает при использовании ключевых слов «**НЕ**» или «**НЕТ**» применительно к проектному требованию. В данном случае получится: «**НЕ ПЕРЕМЕЩАЕТСЯ A**».

Затем рассматривается схема технологического процесса для установления причин, которые могли бы полностью прекратить подачу *A*.

Обратимся к рис. 6.1. Начнем с трубопровода, идущего от всасывающего патрубка насоса, который перекачивает исходный материал *A* до того места, где он поступает в реактор.

Причинами прекращения подачи *A* могут быть следующие условия:

1. Расходный резервуар пуст.
2. Не действует насос из-за механической поломки, повреждения электросети или отключения насоса и т.д.
3. Разрыв трубопровода.
4. Закрыт запорный клапан.

Очевидно, что, по крайней мере, некоторые из этих причин являются возможными и поэтому можно заключить, что они вызывают существенное отклонение $A + B = C$.

Затем анализируются последствия. Полное прекращение доступа потока материала *A* скоро приведет к тому, что количество материала *B* в реакторе будет превышать количество материала *A*, что может привести к опасности взрыва. Таким образом, выявлены опасности в конструкции, и они отмечены для дальнейшего рассмотрения.

Следующее ключевое слово: «**БОЛЬШЕ**». Отклонения выражаются следующими словами:

«В РЕАКТИВНЫЙ СОСУД ПОСТУПИЛО БОЛЬШЕ ВЕЩЕСТВА A».

Причиной этому могут быть технические характеристики насоса, которые при определенных обстоятельствах приведут к увеличению скорости потока одного из веществ. Если это вполне объяснимая причина, то рассматривают следующие последствия:

1. В результате реакции в реактивном сосуде образуется вещество *C*, загрязненное избытком вещества *A*, переходящее в таком виде в следующую стадию процесса.

2. Избыточный поток в реактивный сосуд предполагает, что часть вещества будет удалена через сливное устройство.

Для решения вопроса о степени опасности таких обстоятельств нужна дополнительная информация.

Следующее ключевое слово «**МЕНЬШЕ**». Отклонение сформулировано как: «**В РЕАКТИВНЫЙ СОСУД ПОСТУПИЛО МЕНЬШЕ ВЕЩЕСТВА А**».

Причины этого события несколько отличаются от причин, вызвавших отклонение от режима в результате прекращения подачи **А**:

1. Запорный клапан открыт неполностью.

2. Частичная закупорка трубопровода.

3. Насос не справляется с подачей жидкости из-за снижения своих рабочих характеристик.

Следствие аналогично тому, которое явилось результатом полного прекращения потока, и поэтому потенциальная опасность — это возможность взрыва.

Затем оставшиеся ключевые слова по очереди применяются к проекту конструкции этой части, для того чтобы обеспечить исследование всех возможных отклонений.

После проверки трубопровода, по которому в реактор поступает материал **А**, он отмечается на карте технологического процесса как прошедший проверку. Затем выбирается следующая часть конструкции для исследования, и это может быть трубопровод для подачи исходного материала **В** в реактор. Это повторяется (рис. 6.2) для каждой части конструкции, каждого трубопровода, вспомогательных устройств, например мешалок, любых средств обслуживания реактора (подача тепла и холода) и самого реактора. Вот почему этот метод иногда называют **методом последовательной экспертизы**.

Только при исключительных обстоятельствах на каждом этапе анализа составляется письменный отчет, придерживаясь рассмотренной структуры описания **ПАО**. Обычным является проведение анализа с записью только потенциальных опасностей и их причин, например по форме, представленной в табл. 6.1, и последующим устным их обсуждением.

Таблица 6.1

Изучение опасностей и функционирования системы

Ключевое слово	Нарушения	Причина	Опасность и последствия	Требуемые меры защиты
Нет	Нет подачи вещества А	Закрыт клапан	Больше В — взрыв из-за нарушения реакции	Предусмотреть электроблокировку включения насоса



Рис. 6.2. Последовательность проведения экспертизы

Значения ключевых слов. Необходимо четко представлять их значения, определяемые толковым словарем, и придерживаться единообразия при исследовании системы. Ключевые слова (фразы, выражения) применяются для характеристики системы, где имеется информация (описание, техкарта и пр.), как должно действовать оборудование или протекать технологический процесс.

На примере были продемонстрированы принципы, лежащие в основе этого метода, и было показано, как применять первые три ключевых слова. Обычно они используются в своем прямом значении и дают четкую характеристику отклонения от технологического режима. Остальные слова требуют некоторых дополнительных пояснений. Их значение также рассмотрены на примере (рис. 6.1). Следующие два отклонения от проекта имеют качественный характер. Ключевыми словами являются **ТАК ЖЕ КАК**, а отклонение — **ТАК ЖЕ КАК ПЕРЕМЕЩЕНИЕ А**. Это может означать:

1. Перемещение какого-либо компонента в дополнение к **А**. Анализ технологического процесса (рис. 6.1) показывает наличие дополнительного трубопровода с запорным клапаном насоса. Если этот клапан не закрыт, вместе с **А** в реактор может поступать другой компонент. При этом появляется возможность того, что этот компонент либо будет оказывать характерное для него действие, либо будет играть роль инертного разбавителя **А**.

2. Перемещение **А** куда-нибудь еще кроме реактора. При анализе карты технологического процесса мы видим, что это возможно. Он мог бы перемещаться вверх по трубопроводу до всасывающего отверстия насоса через **Т**-образный участок.

3. Другие процессы, происходящие одновременно с перемещением **А**. Например, может ли происходить кипение или разложение **А** в трубопроводе или насосе?

Другим отклонением может быть такое отклонение, которое явилось причиной неполной реализации проектного замысла. Ключевыми словами являются: **ЧАСТЬ ЧЕГО-ЛИБО** и **ОТКЛОНЕНИЕ ЧАСТИ ПЕРЕМЕЩАЕМОГО А**. Это могло бы означать:

1. Компонент **А** отсутствует. В данном случае необходимо иметь данные о составе **А** для правильной оценки эффекта отсутствующего компонента.

2. Пропуск одного или более реакторов в том случае, если насос подает **А** в несколько реакторов. Эти последние два отклонения снова имеют качественный характер, однако ни один из проектных замыслов не сохраняется. Первое из отклонений противоречит проекту. Ключевое слово **ОБРАТНЫЙ** и отклонение формулируется **КАК ОБРАТНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ А**. Это означает, что поток направляется из реактора через насос. С помощью технологической схемы (карты) рассматриваются вероятность и возможные последствия такой ситуации.

3. Изучается возможность полной замены проектного замысла чем-нибудь еще. Ключевые слова — **ДРУГОЕ** а **НЕ**, а отклонение — **ЧТО-ТО ДРУГОЕ**, а **НЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ А**. Это могло бы означать:

3.1. Перенос материала, отличающегося от *A*. На технологической карте изучается возможность этого. Такое замещение могло бы произойти, например, при ошибочной подаче другого материала через насос. Необходима дополнительная информация о возможных материалах и их действии.

3.2. Изменение запланированного назначения оборудования. Например, подача компонента *A* не в реактор, а в другую емкость. Изучение карты технологического процесса показывает, что это может произойти через *T*-образный отрезок трубопровода.

3.3. Изменение в характере действия вещества и его состоянии. Например, может ли *A* загустевать вместо того, чтобы перемещаться в трубопроводе?

Дополнительные рекомендации по применению ключевых слов. В предыдущем разделе ключевые слова были представлены в виде набора стандартных терминов, которые могут применяться при рассмотрении проектной документации для того, чтобы сформулировать возможные значимые отклонения. Их значение и применимость зависят от проектных решений, к которым они применяются, и возможного характера отклонений от запланированного процесса или конструкции.

При общем описании могут применяться ключевые слова. При детальном описании они также могут применяться в качестве фраз. Однако при использовании этих слов для более подробных описаний необходимы некоторые ограничения и даже модификации.

Когда они применяются для обозначения таких видов действий, как **РЕАГИРОВАТЬ** и **ПЕРЕМЕЩАТЬ**, обычно можно использовать все ключевые слова для четкой формулировки отклонений от заданного режима. Иногда с помощью одного ключевого слова можно описать несколько отклонений. Все ключевые слова, за исключением, возможно, слова **ОБРАТНЫЙ**, могут также применяться к веществам. В данном случае также можно сформулировать два или несколько отклонений. Например, **БОЛЬШЕ ПАРА** может означать увеличение количества пара или повышение скорости его потока (увеличение расхода пара) или же повышение давления пара (возрастание интенсивности).

При более длительном изучении проекта могут возникнуть ограничения в результате снижения возможности отклонений. Например, рассматривается система, предназначенная для эксплуатации при температуре 100 °С. Единственно возможными отклонениями (если не принимать во внимание абсолютный нуль) являются **БОЛЕЕ**, т. е. выше 100 °С, или **МЕНЕЕ**, т. е. ниже 100 °С.

В тех случаях, когда ключевые слова применяются к временным аспектам, слова **БОЛЕЕ** или **МЕНЕЕ** могут означать увеличение или уменьшение продолжительности или увеличение или снижение частот. Однако для характеристики последовательности действий или событий или абсолютного времени более информативными являются ключевые слова **СКОРЕЕ** или **ПОЗЖЕ**, чем **ИНАЧЕ (ПО-ДРУГОМУ)**. Таким же образом при изучении

таких аспектов, как положения, источник или назначение, более пригодным является **ГДЕ ЕЩЕ**, чем **ИНАЧЕ ЧЕМ**. И снова в этом случае более информативными будут слова **ВЫШЕ** и **НИЖЕ**, чем **БОЛЕЕ** или **МЕНЕЕ**, при характеристике отклонений, связанных с повышением параметров.

При комплексном изучении проекта, предусматривающем характеристику показателей температуры, скорости, состава, давления и т.д., рекомендуется применение всей последовательности ключевых слов отдельно по каждому элементу вместо применения каждого ключевого слова ко всему диапазону характеристик.

При использовании ключевых слов в предложениях также рекомендуется применять последовательность ключевых слов отдельно к каждому слову или фразе, начиная с той части, которая характеризует действие.

6.5. Методы проверочного листа (Check-list) и «Что будет, если ...?» («What — If»)

Помимо рассмотренного метода используются методы, способствующие выявлению критических точек системы, могущих вызвать отказ системы (элемента) или обусловить аварийное состояние производства. Эти методы (чаще — их комбинация) относятся к группе качественных методов оценки опасности, основанных на изучении состояния условий эксплуатации системы (объекта) или проекта действующим требованиям промышленной безопасности. Они дают представления об отклонениях от нормы и могут служить основой для более подробных (в т.ч. и численных) методов анализа, позволяют выработать корректирующие воздействия не только со стороны системы контроля и управления безопасностью, но и внести коррективы в технологический процесс или модернизировать систему. Метод использует промежуточные признаки состояния системы и способствует предотвращению опасных событий. На рис. 6.3 приводится схема использования промежуточных признаков для предотвращения развития опасной ситуации, приводящей в последствии к авариям и несчастным случаям. В плане методического содержания эту схему можно применить к любому производству. В каждом конкретном случае могут изменяться признаки. Опытный специалист по безопасности может заметить промежуточный признак, который не виден лицу, эксплуатирующему оборудование, так же как и оператор технической системы или технолог могут увидеть отклонения от нормы, которые не понятны специалисту по безопасности. Например, в качестве промежуточного признака может выступать излишняя вибрации, шум в отдельных частях агрегата и др. Результат проверочного листа — перечень вопросов и ответов о соответствии исследуемой системы требованиям безопасности и указания по обеспечению безопасности (контрмеры). Метод проверочного листа отличается от «Что будет, если...?» более обширным представлением исходной информации и результатов о последствиях нару-

шений безопасности. Исследование существенно упрощается, если его обеспечить вспомогательными формами, унифицированными бланками, облегчающими на практике проведение анализа и представление результатов. Методы недороги и наиболее эффективны при исследовании безопасности хорошо изученных объектов с известной технологией или объектов с незначительным риском крупных аварий.

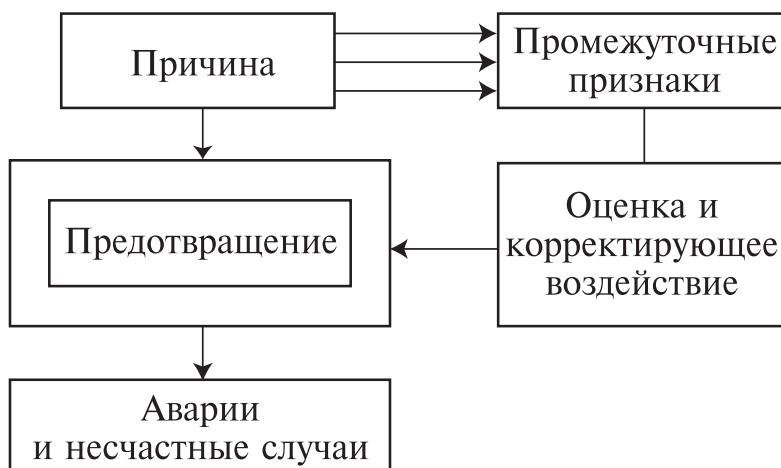


Рис 6.3. Методика использования промежуточных признаков для предотвращения аварий

Эти методы состоят из двух этапов — **общего анализа опасностей** и **детального** в рамках **ПАО**. Цели **общего анализа опасностей** — выявить отклонения, разработать план действий последующего анализа и количественных оценок, определить корректирующие воздействия (контрмеры), которые следовало бы применить немедленно. Может оказаться так, что нет необходимости количественной оценки и, более того, в результате общего анализа удастся выявить и предложить дешевые и простые контрмеры.

Поскольку анализ выполняется на общем уровне, то и правила его проведения выглядят качественно и, возможно, субъективно. Но это необходимый шаг для использования в последующем количественных методов (на этом этапе следует иметь в виду возможную оценку соотношения затраты — прибыль).

Описание каждой из выявленных опасностей следует заносить в карту (табл. 6.2).

На карте проставляется дата, что дает возможность устанавливать хронологию выявления (развития) опасностей, указывается подразделение (цех, участок, подсистема, агрегат и пр.), что дает возможность проследить топографию опасностей. Остальная часть разбита на четыре рубрики. Каждая из них представлена несколькими категориями. Категории располагаются так, что те из них, которые требуют наибольшего внимания при анализе, находятся внизу перечня. Например, если серьезность опасности катастрофическая, вероятность аварии — неминуемая, а затраты — номинальные, то необходимо немедленное действие.

Таблица 6.2

Карта общего анализа опасностей

Подготовил _____ Дата _____			
Описание опасности _____			
Участок системы _____			
Серьезность	Вероятность	Затраты	Действия
Вызывающая беспокойство	Небольшая	Допустимые	Несрочные
Предельно допустимая	Умеренная	Предельные	Анализ
Критическая	Значительная	Значительные	Немедленные
Катастрофическая			

Каждая опасность характеризуется длительностью экспозиции, серьезностью и вероятностью возникновения. Здесь имеется в виду относительная вероятность для того же интервала времени, для которого рассматриваются и другие опасности. Альтернативы в момент составления карты еще не определены, затраты по ним не известны. В этот момент следует ориентироваться на предположительные относительные оценки, которые не претендуют на абсолютную точность. Они могут быть сделаны опытными специалистами.

Столбец «Действия» не заполняется до тех пор, пока не будут собраны и отсортированы все карты. Категории в картах представлены не количественно, и к ним непосредственно не применимы такие операции, как умножение, сложение и т.д. Их содержание полезно для дальнейшего анализа.

При заполнении названных четырех частей карты следует учесть мнение всех заинтересованных служб предприятий. Таким образом, решение о том, что считать опасностью, не требующей экстренных мер, является отчасти групповым решением.

Действия по ликвидации менее существенных опасностей откладываются до устранения опасностей, требующих экстренного вмешательства.

Большинство опасностей относится к категории, требующий дальнейшего анализа перед принятием решения. Анализ занимает некоторое время. Первыми анализируются самые неотложные и серьезные проблемы. Для этого карты анализа располагаются в порядке срочности требуемых действий, используя признак **серьезность—вероятность—затраты**, придерживаясь следующей процедуры.

1. Предварительная сортировка. Отбираются все карты с катастрофически серьезными опасностями, затем карты с серьезностью, соответствующей критической, а далее с предельно допустимой и вызывающей беспокойство. Внутри каждой из этих категорий карты сортируются по вероятности аварий соответственно: неотвратимая, значительная, умеренная

и небольшая. Наконец, внутри каждой группы проводится аналогичная сортировка по затратам. Так карты окажутся рассортированными по затратам внутри вероятности аварии, а далее — внутри категорий серьезности. При сортировке придается наибольшее значение серьезности, а затратам — наименьшее.

2. Пересмотр и ранжирование опасности. Следует по порядку пересмотреть все карты. Надо сверить первую карту со второй, задавшись вопросом: «Действительно ли первая опасность серьезнее второй?» и «Что будет, если...?» Тут уже выносится субъективное решение на базе всей имеющейся информации. Если покажется необходимым, то карты меняют местами. После контроля первых двух карт вторая сравнивается с третьей. Таким образом, за один просмотр колоды карт достигается упорядоченность оценок опасности.

3. Составление приоритетного перечня. Перекладка карт здесь уже не имеет места. По картам составляется перечень опасностей для проведения более детального анализа в рамках *ПАО*.

При этих методах анализа имеется два комплекса проблем во время анализа опасностей: изучение самих опасностей и изучение опасных элементов системы, но их можно рассматривать совместно.

Эту связь можно оформить в виде таблицы (табл. 6.3). Каждая карта общего анализа обусловит несколько форм детального анализа: одну для исходного действия и по одной для каждого контрмер или их комбинаций. Формы должны иметь поэлементное соответствие друг с другом.

Таблица 6.3

Бланк детального анализа

Общий анализ опасностей N _____ Участок системы _____ Подготовил _____ Задача или действие _____ Дата _____ Контрмера _____ Затраты _____						
Элементы системы (их комбинация)	Элементы опасности					
	1	2	3	4	5	...
1						
2						
3						
4						
...						

Сначала определяются сомнительные элементы наблюдаемой системы. Для анализа используется способ декомпозиции. Разделение на элементы должно производиться следующим образом:

1. Перед началом необходимо проследить за работой всей системы в целом.

2. Необходимо установить точку логического начала развития опасности в общей последовательности событий.

3. Начиная с этой точки следует анализировать сомнительный элемент. При этом:

- не следует укрупнять элементы в блоки с целью удобства анализа (в каждой части системы может находиться свой элемент опасности);
- не следует мельчить систему на множество элементов, если они работают в одном модуле (нет необходимости усложнять анализ).

4. Повторить шаг 3 для всей последовательности элементов, чтобы не пропустить (пробелы) или не включить дважды элемент (наложения на один из элементов).

5. Если встречаются комбинации (варианты), анализировать их следует отдельно, а затем можно скомбинировать при составлении общего списка. Элементы системы, имеющие одновременно опасные состояния, надо располагать так, чтобы можно было выделить и оценить присущие им специфические опасности.

6. Свести поэлементный анализ в форму «Детальный анализ» в том порядке, в котором опасности появляются.

После завершения списка опасностей может оказаться несколько вариантов бланков. В бланках удобно использовать символы, обозначающие ситуацию (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Символика анализа опасностей

Символ	Значение
<i>X</i>	Опасность присутствует в элементе
<i>R</i>	Опасность снижается контрмерой
<i>R1, R2, R3...</i>	Опасность снижена до степени, соответствующей норме
«—» (пробел)	Опасность в элементе устранена
<i>E</i>	Опасности в элементе не было
<i>I</i>	Контрмера увеличивает опасность

В результате появляется возможность наглядно представить опасности каждого элемента (модуля, блока) системы.

Обычно перечень составляется так, что вначале показываются более серьезные опасности. На этом этапе не следует применять количественных оценок для сравнения различных общих опасностей. Полная картина необходима для представления всей проблемы перед переходом к дальнейшим видам оценки.

На этом аналитическая часть процедуры оценки заканчивается. В итоге для проведения качественного анализа необходимо следующее:

- составить список опасностей по результатам общих исследований, оценкам характера технологии, по промежуточным признакам. Принять немедленные действия для очевидных контрмер;
- на основании беглого анализа заполнить карты общего анализа для каждой выявленной опасности;
- рассортировать карты опасностей, размещая первыми более критичные, для того чтобы сформировать приоритетный список для детального изучения;
- выполнить детальный анализ опасностей для всех опасностей, которые этого требуют. Отсюда исключаются опасности, для которых контрмеры очевидны и недороги, а также несущественные по мнению специалистов.

Детальный анализ в границах **ПАО** проводится после общего, когда устранены опасности, не требующие больших затрат. Остальные опасности ранжированы в соответствии с качественной оценкой их важности.

Анализ состоит в следующем:

1. Опасности классифицируются по месту и времени действия в операции, что позволяет лучше оценить серьезность и продолжительность опасности.
2. Выявляются изначальные причины аварий вместо использования промежуточных признаков и симптомов.
3. Подробно рассматриваются влияния контрмер, что трудно сделать при более общем анализе.
4. Прослеживается влияние каждой контрмеры на все элементы системы и проверяется, не увеличивается ли опасность в каких-либо взаимодействующих частях системы.

Следующий этап детального анализа — **матричное представление опасностей**. Цель — дать информацию о затратах и эффективности в сжатой и логичной форме. При этом информация не обрабатывается, не формализуется, а только лишь представляется в удобном виде для принятия правильного решения. Как правило, производится сравнение альтернативных вариантов и различных типов общих опасностей.

В матрице элементы опасности, выявленные в ходе детального анализа, располагаются в порядке важности. Альтернативные варианты указываются в вертикальном столбце и тут же указываются затраты на данную контрмеру. В поле матрицы в местах пересечения опасностей и контрмер указываются символы: «—» — устранение элемента опасности, **R** — снижение опасности, **X** — опасность не изменилась, **I** — опасность увеличилась.

Экономическая эффективность мероприятий представляет собой дополнительную переменную, выявленную в ходе детального анализа.

Матричное представление не гарантирует оптимальность решения, поскольку этот метод является только рациональным для формирования заключения за счет упорядочения качественной оценки опасностей.

6.6. Анализ вида и последствий отказа — АВПО (Failure Mode and Effects Analysis — FMEA)

Применяется для качественной оценки безопасности технических систем. Существенной чертой этого метода является рассмотрение каждой системы в целом или каждой составной ее части на предмет того, как она может стать неисправной (вид и причина отказа) и как этот отказ воздействует на технологическую систему (последствия отказа).

Анализ вида и последствий отказа (**АВПО**) является анализом индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последовательного рассмотрения одного элемента за другим, анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляются их результирующие воздействия на систему. Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов выявляются и анализируются для того, чтобы определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом. **АВПО** можно выполнить более детально, чем анализ с помощью дерева отказов, поскольку при этом необходимо рассматривать все возможные виды отказов или аварийные ситуации для каждого элемента системы. Например, реле может отказать по следующим причинам: контакты не разомкнулись; запаздывание в замыкании контактов; короткое замыкание контактов на корпус, источник питания, между контактами и в цепях управления; дребезжание контактов; неустойчивый электрический контакт; контактная дуга; разрыв обмотки и пр.

Дополнительно для каждой категории оборудования должен быть составлен перечень необходимых проверок. Например, для баков, других емкостей и секций трубопроводов такой перечень может включать:

- переменные параметры: расход, количество, температуру, давление, насыщение и т. д.;
- системы: нагрева, охлаждения, электропитания, подачи, управления и т. д.;
- особые состояния: обслуживание, включение в работу, выключение, смену катализатора и т. д.;
- изменения условий или состояния: слишком большое (давление), слишком малое, гидроудар, осадок, вибрация, пожар, падение, механическое повреждение, коррозия, разрыв, утечка, износ, взрыв и др.;
- прибор: чувствительность, настройка, запаздывание и т. д.

Карта проверки представляет собой изложение **АВПО**, а ее форма подобна используемой при выполнении **ПАО**. Основная разница заключается в большей степени детализации.

Метод рассматривает все виды отказов по каждому элементу. Он ориентирован на аппаратуру и механические системы, прост для понимания, не требует применения математического аппарата. Такой анализ позволяет установить необходимость внесения изменений в конструкцию и оценить их влияние на надежность системы. Его недостаток состоит в том, что он рассматривает неопасные отказы, требует значительных затрат времени и часто не учитывает сочетания отказов и человеческого фактора.

6.7. Анализ вида, последствий и критичности отказа — АВПКО (Failure Mode, Effects and Critical Analysis — FMECA)

Если помимо влияния вида отказа рассматривается еще и степень его серьезности или относительный вес, то процедура называется анализом критичности отказов.

В этом случае каждый вид отказа ранжируется с учетом двух составляющих критичности — вероятности (или частоты) и тяжести последствий отказа. Понятие критичности близко к понятию риска и может быть использовано при более детальном анализе риска аварии. Определение параметров критичности необходимо для выработки указаний и приоритетности мер безопасности.

При анализе необходимо выделить четыре группы объектов, которым может быть нанесен ущерб от опасности (аварии): **персонал, население, окружающая природная среда, материальные объекты** (оборудование, сооружения промышленных предприятий и близлежащих населенных пунктов).

Анализ критичности (**АК**) используется после проведения **ПАО** или **АВПО** и классифицирует элементы по различным категориям критичности для различных видов отказов.

Категория 1. Отказ, потенциально приводящий к жертвам.

Категория 2. Отказ, потенциально приводящий к невыполнению основной задачи.

Категория 3. Отказ, приводящий к задержкам, сбою или потере работоспособности.

Категория 4. Отказ, приводящий к дополнительному, незапланированному обслуживанию.

Введение категорий критичности является очевидным «следующим шагом» после проведения **АВПО**, формируя объединенный метод — **анализ видов, последствий и критичности отказов**.

Элементы можно классифицировать, вычислив коэффициенты критичности C_r :

$$C_r = \sum_{i=1}^N \beta \alpha K_E K_A t \lambda_G \cdot 10^6, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (6.7.1)$$

где: C_r — коэффициент критичности для элементов системы;
 n — число критических видов отказов элемента системы, которые попадают под конкретное определение потерь;
 N — последний критический вид отказа элемента системы, соответствующий определенному виду потерь;
 λ_G — соответствующая частота отказов элементов системы, выраженная в отказах за час или цикл работы;
 t — время работы в часах или число циклов данного элемента при выполнении программы;
 K_A — коэффициент, учитывающий разницу между загрузкой элемента при определении параметра λ_G и ожидаемой загрузкой элемента в данной системе;
 K_E — коэффициент окружающих условий, учитывающий разницу между окружающими условиями при замере параметра λ_G и ожидаемыми условиями работы элемента.

Примечание. При упрощенном вычислении можно пренебрегать коэффициентами K_A и K_E , а значение λ_G использовать в качестве приближенного значения интенсивности отказов для данного вида отказа и условий работы.

α — коэффициент отношения данного вида отказа к критическому (доля от λ_G , вносимая этим отказом в критическое состояние системы); β — условная вероятность того, что последствия отказа для данного вида критического отказа имеют место при условии, что произошел критический отказ данного вида. Значение β следует выбирать из следующего набора величин:

Последствия отказа	Типичные значения β , %
Фактические потери	100
Вероятные потери	10—100
Возможные потери	0—10
Отсутствие потерь	0

Множитель, переводящий коэффициент C_r потерь от реализации опасности к потерям на 1 млн возможных событий, равен 10^6 .

Данный метод не дает количественной оценки возможных последствий или ущерба. Основная его ценность заключается в улучшении качества системы путем определения:

- элемента, который должен быть подвергнут детальному анализу с целью исключения опасностей, приводящих к возникновению аварии, т. е. с целью создания надежной конструкции, снижающей интенсивности отказов или ограничения ущерба;

- элемента или узла, требующего особого внимания в процессе производства и более жесткого контроля качества и нуждающегося в особо осторожном обращении в течение всего времени использования;
- специальных требований для поставщиков, подлежащих включению в перечень характеристик, которые относятся к конструкции, функционированию, надежности, безопасности или гарантии качества;
- норм входного контроля, которые должны быть установлены для элементов, получаемых от смежников (субподрядчиков) и для параметров, подлежащих наиболее тщательной проверке;
- узлов систем (подсистем), где следует вводить специальные процедуры, правила безопасности, применять защитное оборудование, контрольные приборы или сигнальные системы;
- эффективного распределения средств на предотвращение аварий.

6.8. Дерево отказов — ДО (Fault Tree Analysis — FTA)

Тщательному анализу причин отказов и выработке мероприятий, наиболее эффективных для их устранения, способствует построение дерева отказов и неработоспособных состояний. Такой анализ проводят для каждого периода функционирования, каждой части или системы в целом.

Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий, несчастных случаев и пр.) лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями); при анализе возникновения отказа состоит из последовательностей и комбинаций нарушений и неисправностей, и таким образом оно **представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения** (рис. 6.4).

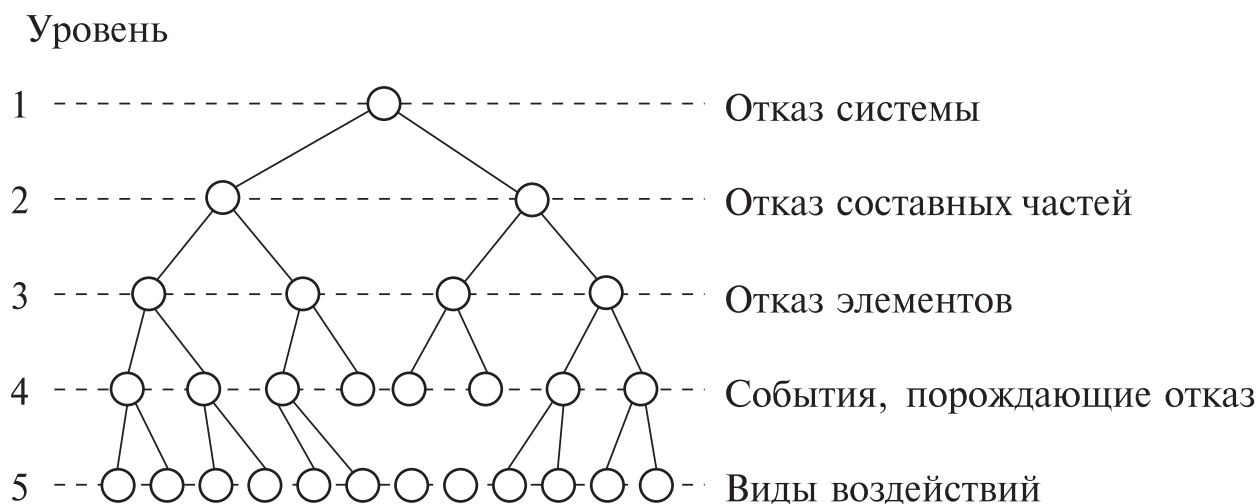


Рис. 6.4. Граф дерева отказов

Ценность дерева отказов заключается в следующем:

- анализ ориентируется на нахождение отказов;
- позволяет показать в явном виде ненадежные места;
- обеспечивается графикой и представляет наглядный материал для той части работников, которые принимают участие в обслуживании системы;
- дает возможность выполнять качественный или количественный анализ надежности системы;
- метод позволяет специалистам поочередно сосредотачиваться на отдельных конкретных отказах системы;
- обеспечивает глубокое представление о поведении системы и проникновение в процесс ее работы;
- являются средством общения специалистов, поскольку они представлены в четкой наглядной форме;
- помогает дедуктивно выявлять отказы;
- дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям и анализа компромиссных решений;
- облегчает анализ надежности сложных систем.

Главное преимущество дерева отказов (по сравнению с другими методами) заключается в том, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов системы и событий, которые приводят к данному конкретному отказу системы или аварии.

Недостатки дерева отказов состоят в следующем:

- реализация метода требует значительных затрат средств и времени;
- дерево отказов представляет собой схему булевой логики, на которой показывают только два состояния: рабочее и отказавшее;
- трудно учесть состояние частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа;
- трудности в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащие резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов;
- требует от специалистов по надежности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа;
- дерево отказов описывает систему в определенный момент времени (обычно в установившемся режиме), и последовательности событий могут быть показаны с большим трудом, иногда это оказывается невозможным. Это справедливо для систем, имеющих сложные контуры регулирования.

Чтобы отыскать и наглядно представить причинную взаимосвязь с помощью дерева отказов, необходимы элементарные блоки, подразделяющие и связывающие большое число событий. Имеется два типа блоков: логические символы (знаки) и символы событий.

Логические символы. Логические символы (знаки) связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями. Обозначения логических знаков приведены в табл. 6.5. Логический символ (знак) может иметь один или несколько входов, но только один выход, или выходное событие.

Логический знак «И» (схема совпадения). *Выходное событие логического знака И наступает в том случае, если все входные события появляются одновременно.*

Правило формулирования событий. События, входные по отношению к операции **И**, должны формулироваться так, чтобы второе было условным по отношению к первому, третье условным по отношению к первому и второму, а последнее — условным ко всем предыдущим. Кроме того, по крайней мере одно из событий должно быть связано с появлением выходного события.

Полная характеристика события не требуется. Иногда она даже мешает графической ясности диаграммы. Требуется лишь *упорядочить события так, чтобы стоящее справа зависело от появления стоящего слева*. Таким образом, *появление выходного события будет определяться появлением последнего события в ряду N — событий*.

Правило применения логического знака И. Если имеются несколько причин, которые должны появиться одновременно, то обычно используют операцию **И**. *Входы операции должны отвечать на вопрос: «Что необходимо для появления выходного события?»*.

Логический знак «ИЛИ» (схема объединения). *Выходное событие логического знака ИЛИ наступает в том случае, если имеет место любое из входных событий*.

Правило формулирования событий. События, входные по отношению к операции **ИЛИ**, должны формулироваться так, чтобы они вместе исчерпывали все возможные пути появления выходного события. Кроме того, любое из входных событий должно приводить к появлению выходного события.

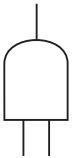
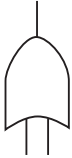
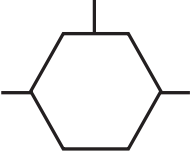
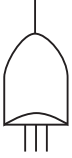
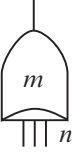
Правило не дает способа описания событий, но оно должно выполняться при построении дерева отказа.

Правило применения логического знака ИЛИ. Если любая из причин приводит к появлению выходного события, следует использовать операцию **ИЛИ**. *Входы операции отвечают на вопрос: «Какие события достаточны для появления выходного события?»*.

Порядок применения логических знаков И и ИЛИ. Для любого события, подлежащего дальнейшему анализу, *вначале рассматриваются все возможные события, являющиеся входами операций ИЛИ, затем входы операций И*. Это справедливо как для головного события, так и для любого события, анализ которого целесообразно продолжить.

Таблица 6.5

Логические символы

Стро- ка	Символ логи- ческого знака	Название логического знака	Причинная взаимосвязь
1		<i>И</i>	Выходное событие происхо- дит, если все входные собы- тия случаются одновременно
2		<i>ИЛИ</i>	Выходное событие происхо- дит, если случается любое из входных событий
3		<i>«Запрет»</i>	Наличие входа вызывает на- личие выхода тогда, когда происходит условное событие
4		<i>«Приоритетное И»</i>	Выходное событие случается, если все входные события происходят в нужном поряд- ке слева направо
5		<i>«Исключающее ИЛИ»</i>	Выходное событие происхо- дит, если случается одно (но не оба) из входных событий
6		<i>«m из n» (голосования или выборки)</i>	Выходное событие происхо- дит, если случается <i>m</i> из <i>n</i> входных событий

Примеры этих двух логических знаков показаны на рис. 6.5. Событие ***«возникновение пожара»*** имеет место, если два события — ***«утечка горючей жидкости»*** ***И*** ***«очаг воспламенения вблизи горючей жидкости»*** происходят одновременно. Последнее (критическое) событие случается, если происходит одно из двух событий — ***«наличие искры»*** ***ИЛИ*** ***«курящий рабочий»***.

Причинные связи, выраженные логическими знаками И и ИЛИ, являются детерминированными, так как появление выходного события полностью определяется входными событиями.

Логический знак запрета. Шестиугольник, являющийся логическим знаком запрета и расположенный в строке 3 табл. 6.5, используется для представления вероятностных причинных связей. Событие, помещенное под логическим знаком запрета (рис. 6.6, а) называется входным событием, в то время, как событие, расположенное сбоку от логического знака, назы-

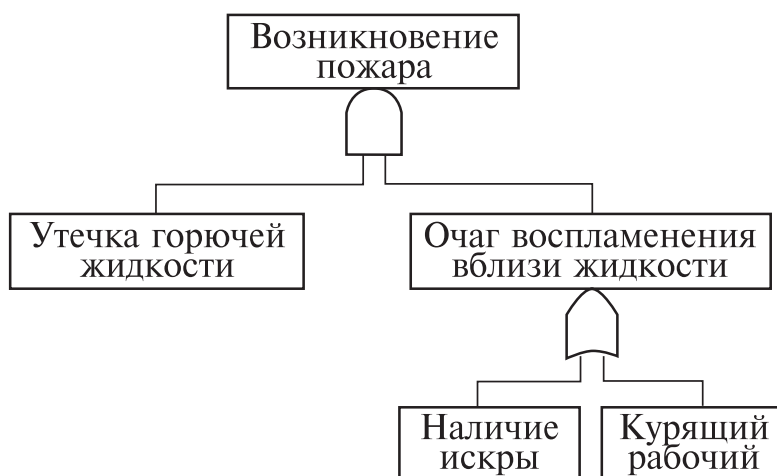


Рис. 6.5. Пример использования логических знаков **И** и **ИЛИ**

вается условным событием. Условное событие принимает форму события при условии появления входного события. Выходное событие происходит, если и входное и условное событие имеют место. Другими словами, входное событие вызывает выходное событие с вероятностью (обычно постоянной) появления условного события. Логический знак запрета часто появляется в тех случаях, когда событие вызывается по требованию. Он используется главным образом для удобств и может быть заменен логическим знаком **И**, как показано на рис. 6.6, б).

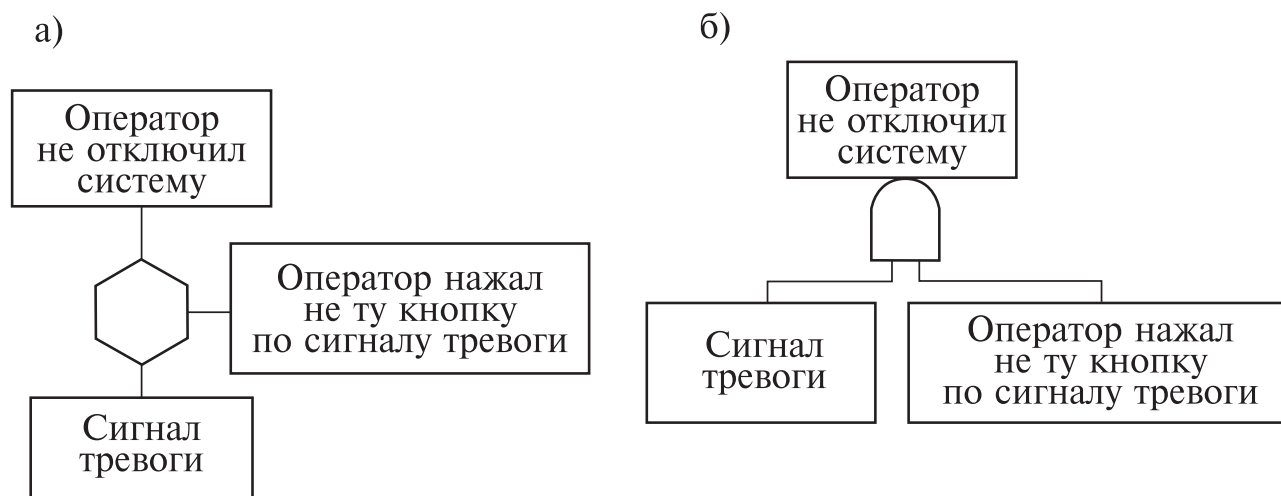


Рис. 6.6. Пример использования логического знака запрета (а) и замены его логическим знаком **И** (б)

Логический знак «приоритетное И» (строка 4 в табл. 6.5) эквивалентен логическому знаку **И** с дополнительным требованием того, чтобы события на входе происходили в определенном порядке.

Событие на выходе появляется, если события на входе происходят в определенной последовательности (слева направо). Появление событий на входе в другом порядке не вызывает события на выходе. Рассмотрим, например, систему, имеющую основной источник питания и резервный.

Резервный источник питания включается в работу автоматически переключателем, когда отказывает основной источник. Питание в системе отсутствует, если:

- 1) отказывают как основной, так и резервный источники;
- 2) сначала выходит из строя переключатель, а затем отказывает основной источник питания.

Предполагается, что если за отказом переключателя следует отказ основного источника, то это не приведет к потере питания при условии нормальной работы резервного источника. Причинные связи в системе показаны на рис. 6.7. Логический символ «приоритетное И» может быть представлен сочетанием «логического И» и знака «запрета», а следовательно, эти логические знаки являются эквивалентом «логического И». Условным событием для «логического запрета» является то, что входные события логического знака **И** происходят в определенной последовательности. Эквивалентное представление дерева, изображенного на рис. 6.7, показано на рис. 6.8.

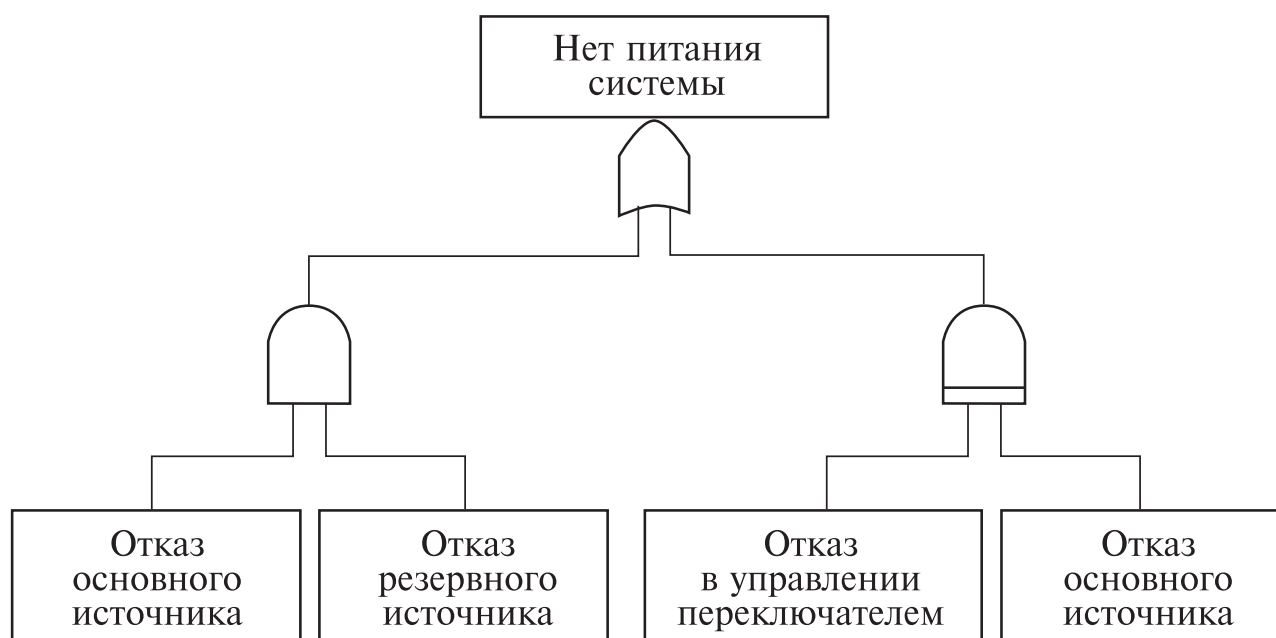


Рис. 6.7. Пример использования логического знака «приоритетное И»

Логический символ «исключающее ИЛИ» (строка 5 в табл. 6.5) описывает ситуацию, в которой событие на выходе появляется, если одно из двух (но не оба) событий происходят на входе. В качестве примера рассмотрим систему, питаемую от двух генераторов. Частичная потеря мощности может быть представлена элементом «исключающее ИЛИ», показанным на рис. 6.9, а. «Исключающее ИЛИ» может быть заменено комбинацией логических элементов **И** и **ИЛИ**, что проиллюстрировано на рис. 6.9, б. **Обычно в дереве отказов избегают использования работоспособных состояний, таких как «генератор работает», так как они в значительной степени усложняют количественный анализ.** Разумным подходом является замена логического знака «исключающее ИЛИ» комбинацией знаков **И** и **ИЛИ**.

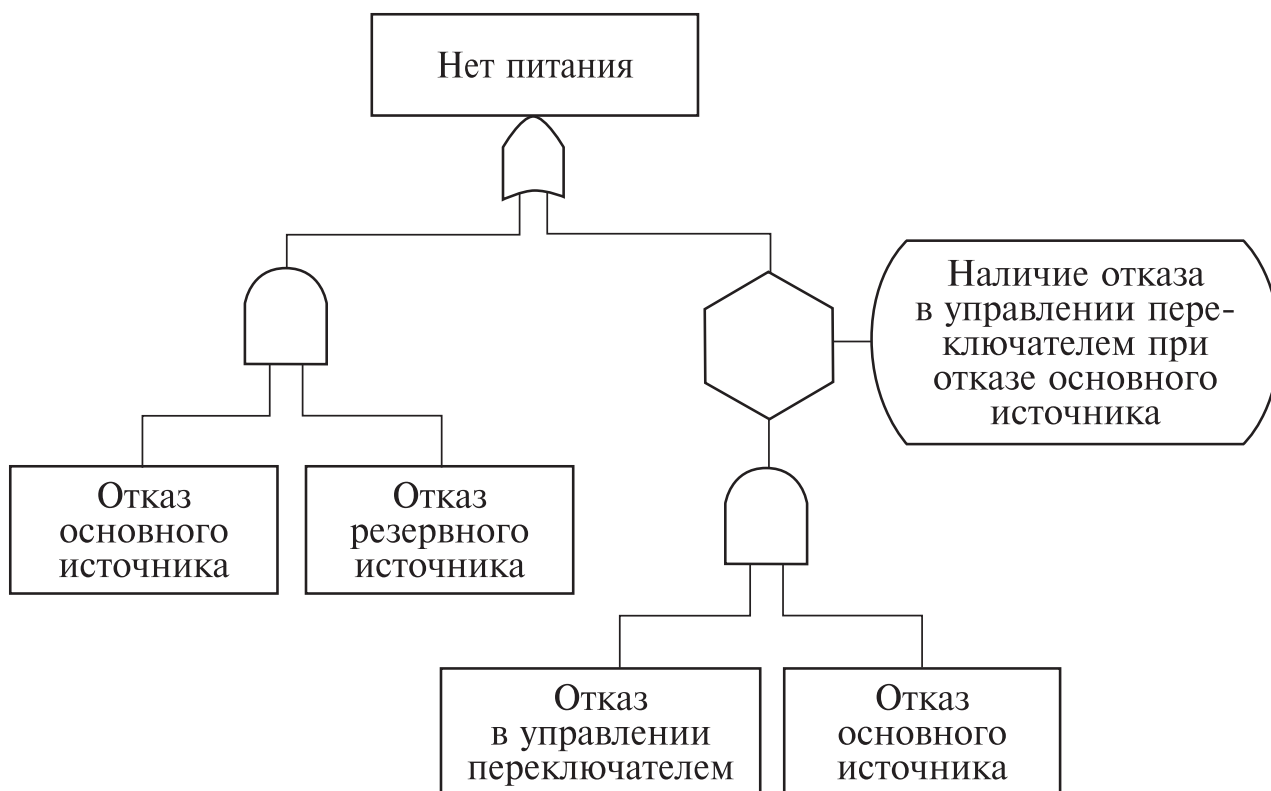


Рис. 6.8. Эквивалентное представление логического знака «приоритетное И»

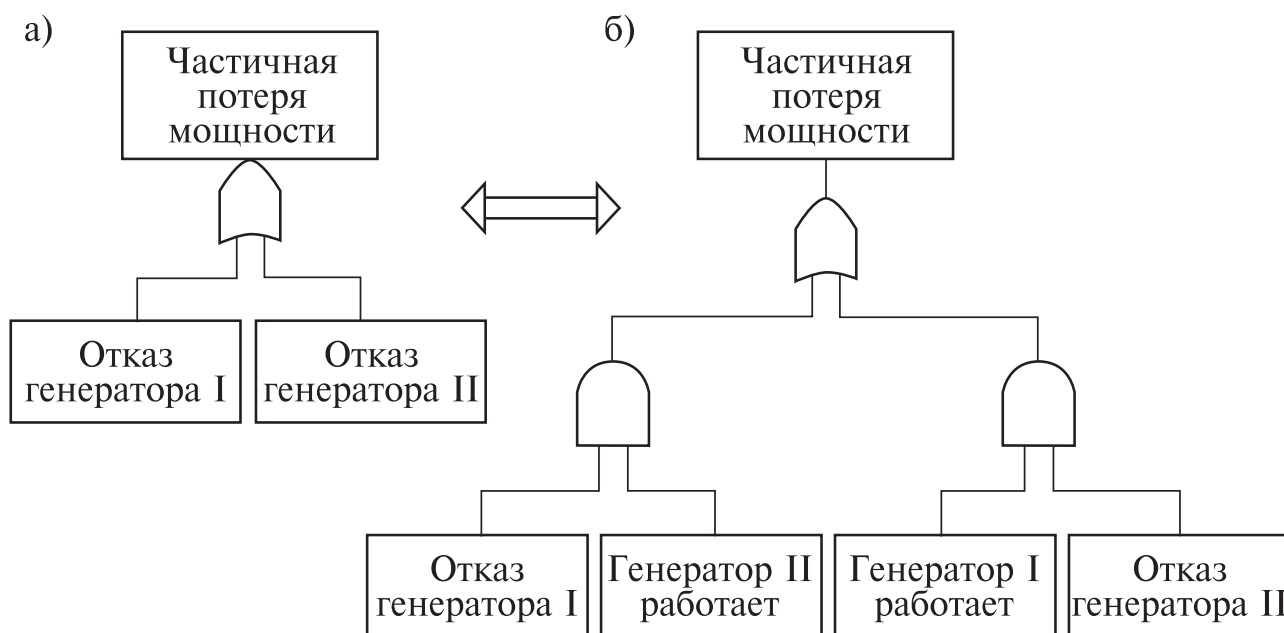


Рис. 6.9. Пример использования логического знака «исключающее ИЛИ» (а) и его эквивалентное представление (б)

Логический знак голосования m из n (строка 6 в табл. 6.5) имеет n событий на входе, а событие на выходе появляется, если происходят по меньшей мере m из n событий на входе. Рассмотрим систему выключения, состоящую из трех контрольных приборов. Предположим, что выключение системы происходит тогда и только тогда, когда два из трех контрольных приборов

выдают сигнал о выключении. Таким образом, ненужное выключение системы происходит, если два или большее число контрольных приборов подадут ложный сигнал на выключение, в то время как система находится в нормальном состоянии.

Эту ситуацию можно представить с помощью логического элемента *«два из трех»*, как показано на рис. 6.10, а. Элемент голосования (выбора) эквивалентен комбинации из логических элементов *И* и *ИЛИ*, как проиллюстрировано на рис. 6.10, б.



Рис. 6.10, а. Пример применения логического знака *«два из трех»*

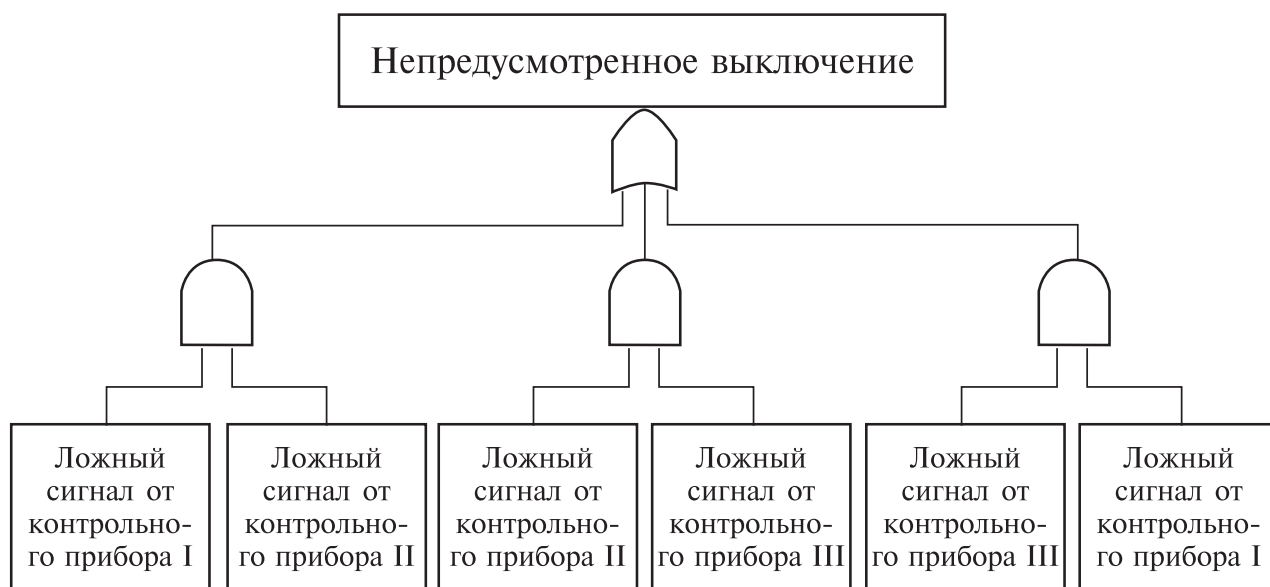


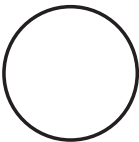
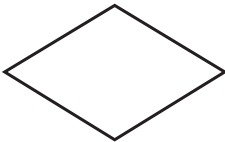
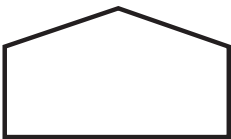
Рис. 6.10, б. Эквивалентное представление логического знака *«два из трех»*

Можно ввести новые логические знаки для представления специальных типов первичных связей. Однако большинство специальных логических символов можно заменить комбинацией логических *И* и *ИЛИ*.

Символы событий. Символы событий приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Символы событий

Стро- ка	Символ события	Содержание события
1		Исходное событие, обеспеченное достаточными данными
2		Событие, недостаточно детально разработано
3		Событие, вводимое логическим элементом
4		Условное событие, используемое с логическим знаком «запрет»
5		Событие, которое может произойти или не произойти
6		Символ перехода

Прямоугольный блок обозначает событие отказа, которое возникает в результате более элементарных, исходных отказов, соединенных с помощью логических элементов.

Круглый блок обозначает исходный отказ (исходное событие) отдельного элемента (в пределах данной системы или окружающей среды), который определяет таким образом разрешающую способность данного дерева отказов (рис. 6.11).

Для того чтобы получить количественные результаты с помощью дерева отказов, *круглые блоки должны представлять события, для кото-*

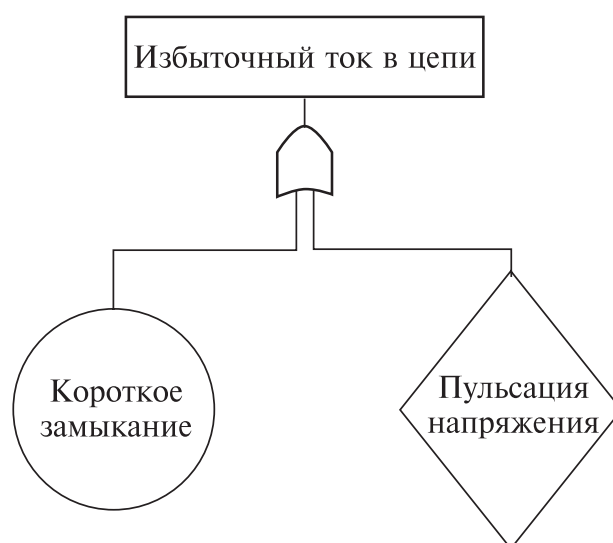


Рис. 6.11. Пример использования символов событий «круг» и «ромб»

рых имеются данные по надежности и которые называются исходными событиями. «Отказ клапана из-за износа» может быть примером исходного отказа элемента и помещается в круг. Обычно такое событие обусловливается определенным элементом и, когда оно происходит, этот элемент необходимо отремонтировать или заменить.

Ромбы используются для обозначения детально не разработанных событий в том смысле, что детальный анализ не доведен до исходных типов отказов в силу отсутствия необходимой информации, средств или времени. «Авария из-за саботажа или диверсии» является примером детально не разработанного события. Часто такие события не увеличиваются при количественном анализе. Они включаются на начальном этапе и их присутствие служит показателем глубины и ограничений данного исследования.

Из рис. 6.11 видно что отказ **«избыточный ток в цепи»** может быть вызван исходным событием **«короткое замыкание»** или событием, не разработанным детально — **«пульсация напряжения в цепи»**.

Если есть необходимость в более детальной разработке события **«пульсация напряжения в цепи»**, то следует использовать прямоугольник, для того чтобы показать, что событие не разработано до более элементарного уровня. Затем необходимо вернуться назад и проанализировать, например, такие элементы, как генератор или другие аппараты в данной схеме.

Символ **домик — ожидаемое событие**. Иногда желательно рассмотреть различные особые случаи дерева отказов, заведомо предполагая, что одни события происходят, а другие события исключаются из рассмотрения. В таких случаях, целесообразно пользоваться символом, изображенным в строке 5 табл. 6.6 в виде **домика**. **Когда этот символ включают в дерево отказов, предполагают, что данное событие обязательно происходит, и возникает противоположная ситуация, когда его исключают.** Можно также опустить причинные взаимосвязи, расположенные под знаком **И**, не учитывая события, заключенного в домике и стоящего на входе этого логического знака. Подобным образом можно аннулировать связи под логическим знаком **ИЛИ**, присоединив событие, заключенное в домике, непосредственно к этому знаку.

Применение символа в виде домика проиллюстрировано на рис. 6.12. Когда событие включается в рассмотрение, предполагается, что контрольный прибор 1 вырабатывает ложный сигнал. Таким образом, получаем логический знак «один из двух», т. е. простой знак **ИЛИ** с двумя входами II и III. Если событие в домике исключается из рассмотрения, получаем простой логический знак **И**.

В строке 6 табл. 6.6 помещена пара треугольных символов: треугольник переноса **«ИЗ»** и треугольник переноса **«В»**, обозначающих два подобных типа причинных взаимосвязей. Обоим треугольникам присвоен одинаковый порядковый номер. Треугольник переноса **«ИЗ»** соединяется с логическим символом сбоку, а у треугольника переноса **«В»** линия связи проходит от вершины к другому логическому символу. **Треугольники используются для того, чтобы упростить изображение дерева отказов.**

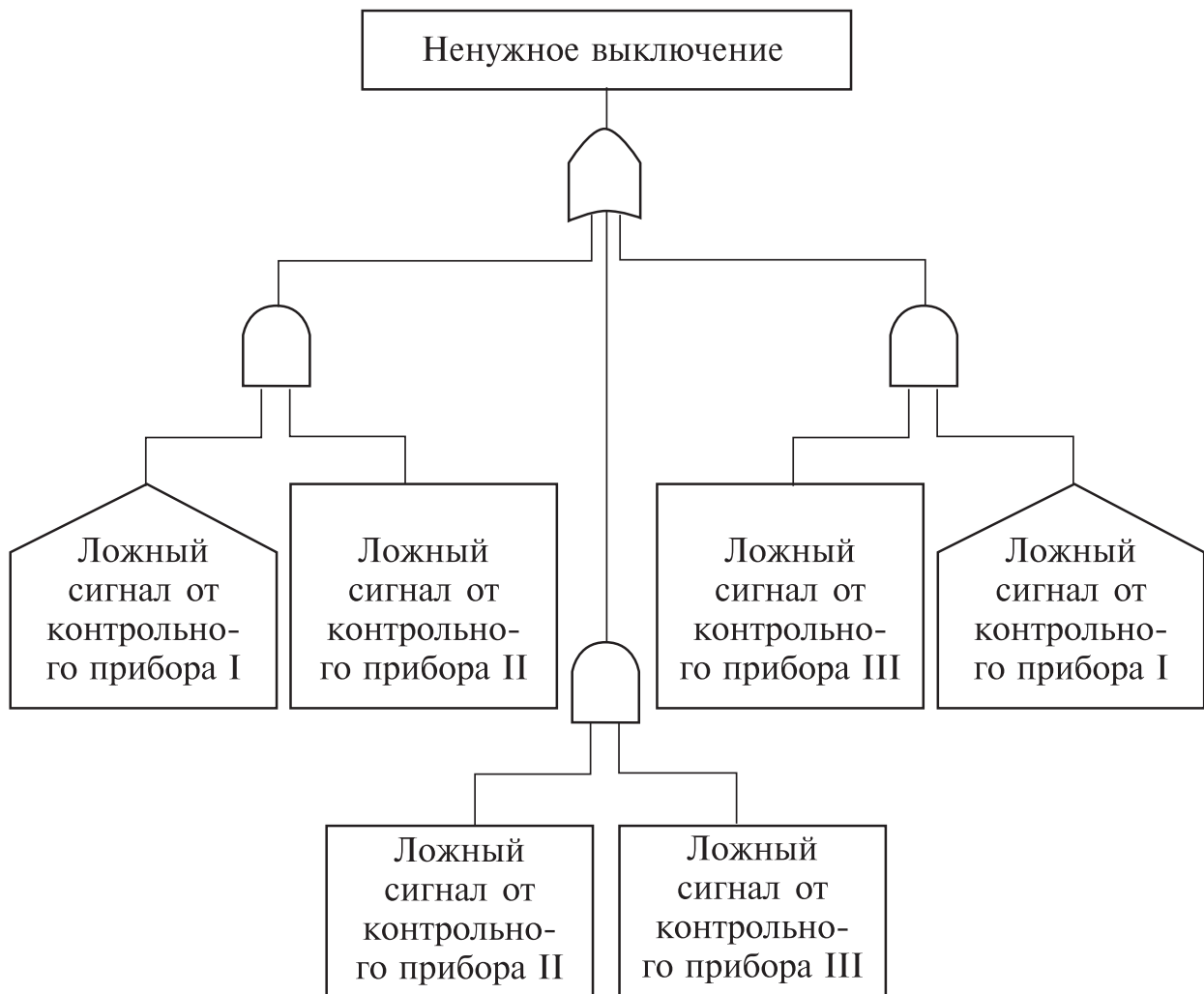


Рис. 6.12. Пример использования символа «домик»

Эвристические правила. Ниже описываются некоторые эвристические правила, используемые для построения дерева отказов. Эти правила сведены в табл. 6.7 и проиллюстрированы на рис.6.13 и рис.6.14, согласно которым следует:

1. **Заменять абстрактные события менее абстрактными**, например, событие «электродвигатель работает слишком долго» на событие «ток через электродвигатель протекает слишком долго».

2. **Разделять события на более элементарные**, например, событие «взрыв бака» заменять на событие «взрыв за счет переполнения» или «взрыв в результате реакции, вышедшей из-под контроля».

3. **Точно определять причины событий**, например, событие «вышедшее из-под контроля» заменять на событие «избыточная подача» или «прекращение охлаждения».

4. **Связывать иницирующие события** с событием типа «отсутствие защитных действий», например, событие «перегрев» заменять на событие «отсутствие охлаждения» в сочетании с событием «нет выключения системы».

5. **Отыскивать совместно действующие причины событий**, например, событие «пожар» заменять на два события «утечка горючей жидкости» и «искрение реле».

Таблица 6.7

Эвристические правила для построения дерева отказов

Строка	Принцип построения	Соответствующая часть дерева отказа
1	Эквивалентное, но менее абстрактное событие	
2	Более детальное разбиение события	
3	Явно выраженные причины события	
4	Иницирующее событие при отсутствии защитных действий	
5	Совместно действующие причины	
6	Точное указание отказавшего элемента	

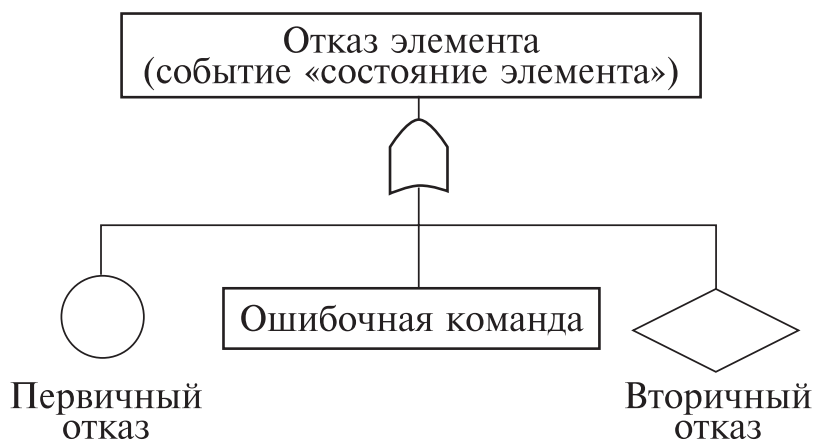


Рис. 6.13. Разработка отказа элемента (событие «состояние элемента»)

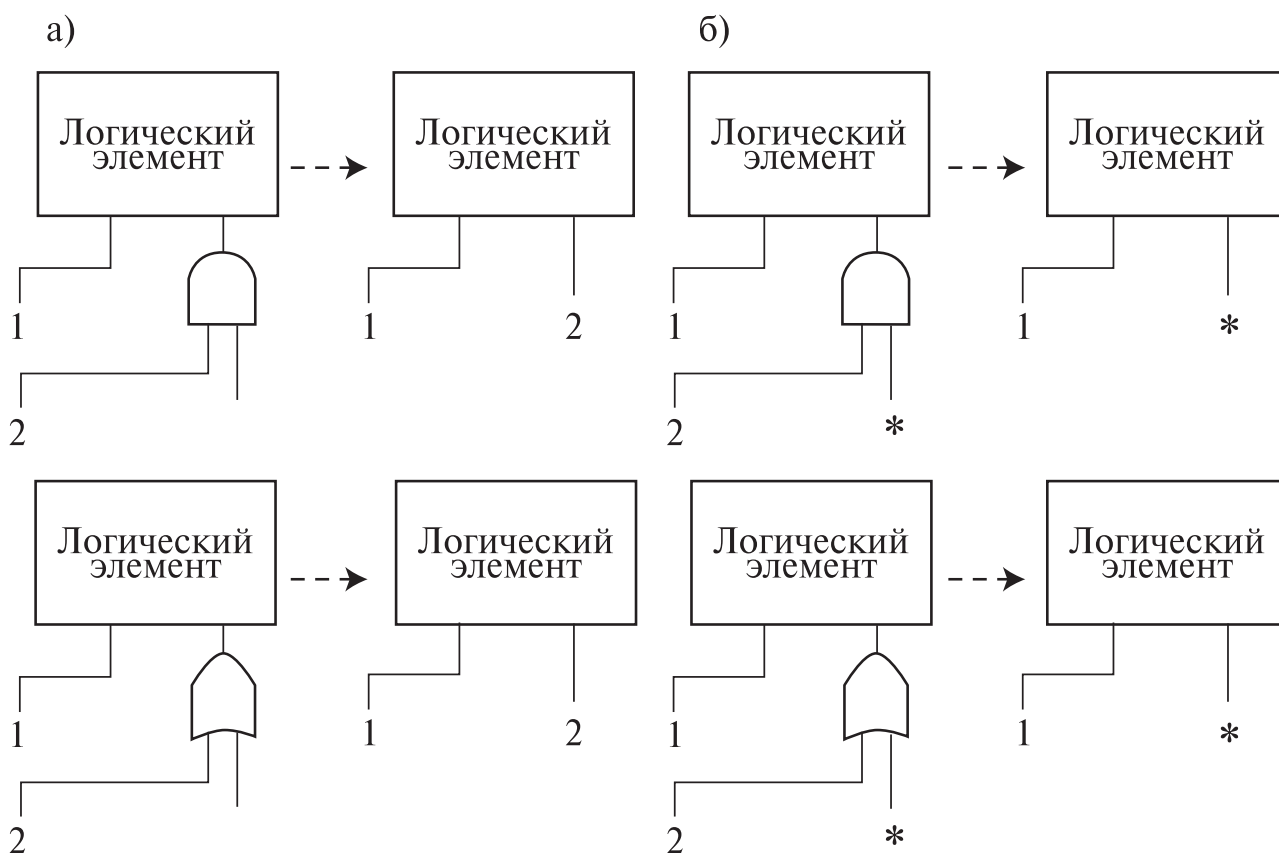


Рис. 6.14. Порядок упрощения с помощью ветви, имеющей нулевую вероятность (а) и очень высокую вероятность (б)

6. **Точно указывать место отказа элемента**, например, событие «нет напряжения на электродвигателе» заменять на событие «нет тока в кабеле»; другой пример: событие «нет охлаждающей жидкости» заменять на событие «главный клапан закрыт» в сочетании с событием «нет открытия отводного клапана».

7. **Детально разрабатывать отказы элементов** в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6.13. Проследивая события в обратном направлении в поисках более элементарных событий, обычно можно обнаружить отказы отдельных элементов. Эти события, в свою очередь, могут быть разработаны по схеме, показанной на рис. 6.13.

Если событие, заключенное в прямоугольнике, может быть детально разработано по схеме, показанной на рис. 6.13, то его называют **«состояние элемента»**. В противном случае событие называют **«состояние системы»**. Для события **«состояние системы»** нельзя выделить определенный элемент, который является единственной причиной данного события. Сразу несколько элементов или даже отдельные подсистемы определяют это событие. Такие события следует разрабатывать, руководствуясь первыми шестью правилами, до тех пор пока не выявятся события **«состояние элемента»**.

8. **Упрощать дерево отказов** как в процессе его построения, так и после того, как оно построено путем упрощения ветвей, имеющих нулевую или очень высокую вероятность появления событий (рис. 6.14).

Процедура построения, содержание анализа и структура дерева отказов

Существо метода заключается в построении структурной схемы дерева отказов системы и ее анализе. **Основной принцип построения дерева отказов заключается в последовательной постановке вопроса: по каким причинам может произойти отказ системы**, т.е. анализ осуществляется **«сверху вниз»**.

Обычно предполагается, что исследователь, прежде чем приступить к построению дерева отказов, тщательно изучает систему. Поэтому описание системы должно быть частью документации, составленной в ходе такого изучения.

Процедура построения дерева отказов включает, как правило, следующие этапы:

1. Определение нежелательного (завершающего) события в рассматриваемой системе.

2. Тщательное изучение возможного поведения и предполагаемого режима использования системы.

3. Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей системы и проведение более глубокого анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.

4. Собственно построение дерева отказов для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться в терминах идентифицируемых независимых первичных отказов.

Чтобы получить количественные результаты для завершающего нежелательного события, необходимо задать вероятность отказа, коэффициент неготовности, интенсивность отказов, интенсивность восстановлений и другие показатели, характеризующие первичные события, при условии что события дерева отказов не являются избыточными (не приводящими к аварии).

Более строгий и систематический анализ предусматривает выполнение таких процедур, как (1) определение границ системы, (2) построение дерева неисправностей, (3) качественная оценка, (4) количественная оценка.

Основой построения дерева отказов является символическое представление существующих в системе условий — событий, способных вызвать отказ. При построении *ДО* учитывают и используют следующие основные виды событий:

- *результатирующее событие* — нежелательное событие (конкретный вид отказа системы из перечня возможных отказов), анализ которого проводится;
- *промежуточное событие* — сложное событие с логическим оператором, являющееся одной из возможных причин результирующего события. Его выявляют в ходе анализа причин результирующего события и подвергают дальнейшему анализу;
- *базовое событие* — простое исходное событие, означающее первичный отказ, которое дальше не анализируется в связи с определенностью и наличием достаточного числа данных;
- *неполное событие* — недостаточно детально разработанное событие, которое дальше не анализируется, из-за невозможности или отсутствия необходимости проведения его анализа.

Исходными событиями при построении *ДО* являются перечни возможных видов событий — отказов и их причин, нерасчетные значения внешних воздействующих факторов и др. Соответственно, каждому виду события и оператора присваиваются символы, которые используются для графического построения дерева отказов. Логические символы связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями.

Построение дерева и анализ исследуемого объекта с его использованием производят следующим образом.

1. Определяют аварийное (предельно опасное, конечное) событие, которое образует вершину дерева. Данное событие четко формулируют, оговаривают условия его появления, дают признаки его точного распознавания. Например, для объектов химической технологии к таким событиям относятся: разрыв аппарата, пожар, выход реакции из-под контроля и др. Определяют возможные первичные и вторичные отказы, которые могут вызвать головное событие, рассматривают их комбинации.

2. Используя стандартные символы событий и логические символы (табл. 6.5—6.7), дерево строят в соответствии со следующими правилами:

- а) конечное (аварийное) событие помещают сверху (уровень 1);
- б) дерево состоит из последовательности событий, которые ведут к конечному событию;
- в) последовательности событий образуются с помощью логических знаков *И*, *ИЛИ* и др.;
- г) событие над логическим знаком помещают в прямоугольнике, а само событие описывают в этом прямоугольнике;
- д) первичные события (исходные причины) располагают снизу.

3. Квалифицированные эксперты проверяют правильность построения дерева. Это позволяет исключить субъективные ошибки разработчика, повысить точность и полноту описания объекта и его действия.

4. Определяют минимальные аварийные сочетания и минимальную траекторию для построенного дерева. Первичные и неразлагаемые события соединяются с событиями первого уровня маршрутами (ветвями). Сложное дерево имеет различные наборы исходных событий, при которых достигается событие в вершине, они называются аварийными сочетаниями (сечениями) или прерывающими совокупностями событий. Минимальным аварийным сочетанием (МАС) называют наименьший набор исходных событий, при которых возникает событие в вершине. Полная совокупность МАС дерева представляет собой все варианты сочетаний событий, при которых может возникнуть авария. Минимальная траектория — наименьшая группа событий, при появлении которых происходит авария.

5. Качественно и количественно исследуют дерево аварий с помощью выделенных минимальных аварийных сочетаний и траекторий. Качественный анализ заключается в сопоставлении различных маршрутов и начальных событий к конечному и определении критических (наиболее опасных) путей, приводящих к аварии. При количественном исследовании рассчитывают вероятность появления аварии в течении задаваемого промежутка времени по всем возможным маршрутам.

6. Разрабатывают рекомендации по введению изменений в объекте, системах контроля и управления для улучшения показателей безаварийности.

В зависимости от конкретных целей анализа, деревья могут быть построены для любых видов отказов — *первичных, вторичных и иницированных отказов*.

Случай первичного отказа. Напомним, что *отказ элемента называется первичным, если он происходит в расчетных условиях функционирования системы*. Построение *ДО* на основе учета лишь такого рода отказов не представляет большой сложности, так как дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ системы.

ПРИМЕР. Требуется построить *ДО* для простой системы — сети, выключателя и электрической лампочки. Считается, что отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, а завершающим событием является отсутствие освещения.

Дерево отказов для этой системы показано на рис. 6.15. Основными (первичными) событиями *ДО* являются (1) отказ источника питания E_1 , (2) отказ предохранителя E_4 , (3) отказ выключателя E_2 и (4) перегорание лампочки E_3 .

Промежуточным событием является прекращение подачи энергии. Исходные отказы представляют собой входы схем *ИЛИ*: при наступлении любого из четырех первичных событий осуществляется завершающее событие — отсутствие освещения.

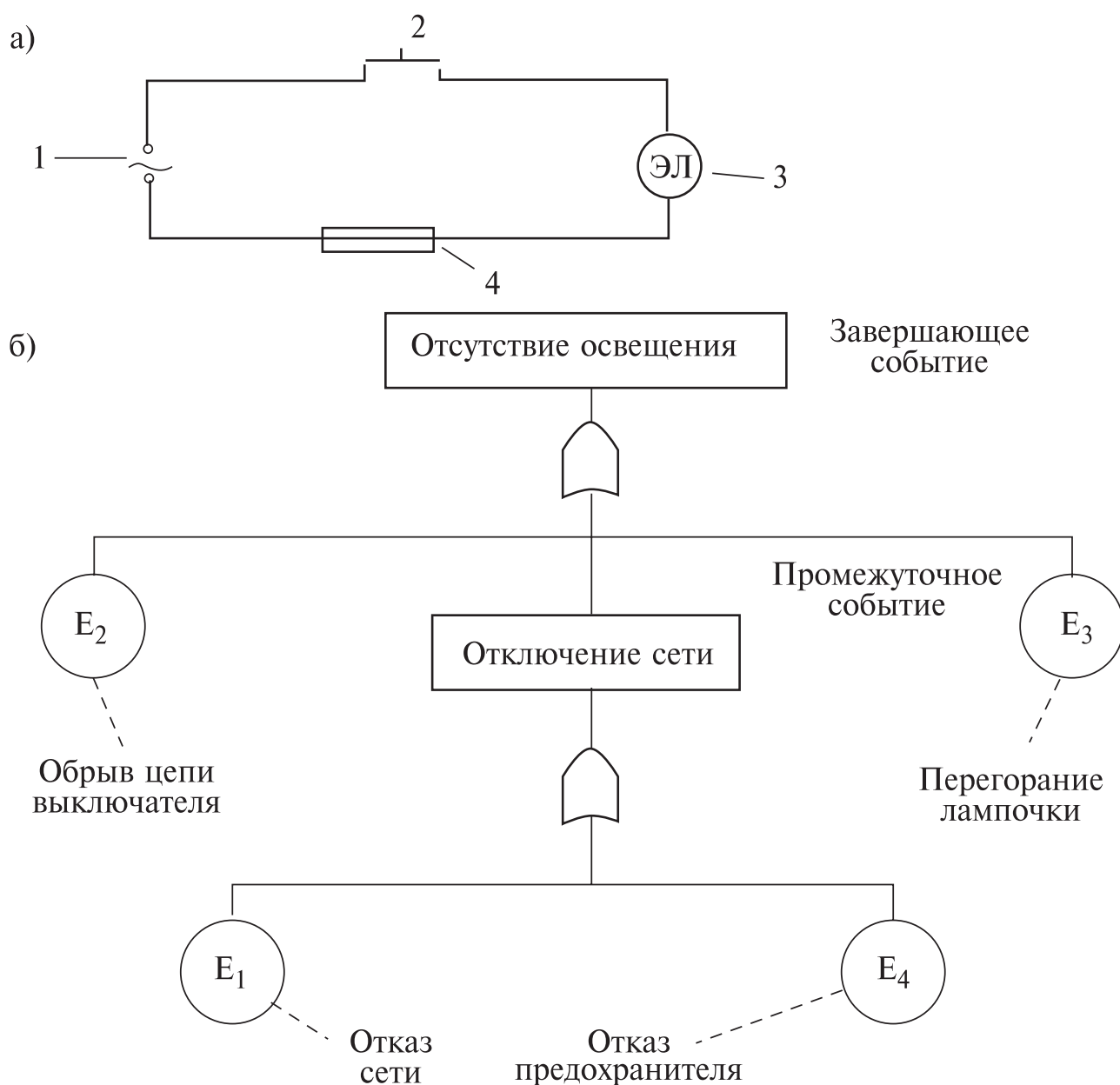


Рис. 6.15. Электрическая схема системы
«сеть — электрическая лампочка» (а)

и дерево (б) для случая первичных отказов:

1 — сеть; 2 — выключатель; 3 — электролампа; 4 — предохранитель

Случай вторичного отказа. В этом случае требуется более глубокое исследование системы. При этом анализ выходит за рамки рассмотрения системы на уровне отказов ее основных элементов, поскольку **вторичные отказы вызываются неблагоприятным воздействием окружающих условий или чрезмерными нагрузками на элемент системы в процессе ее эксплуатации.**

ПРИМЕР. На рис. 6.16 показаны электрическая схема системы и простое дерево отказов с завершающим событием «отказ двигателя».

Конечное событие может быть вызвано тремя причинами: первичный отказ электродвигателя, вторичный отказ и ошибочная команда (инициированный отказ).

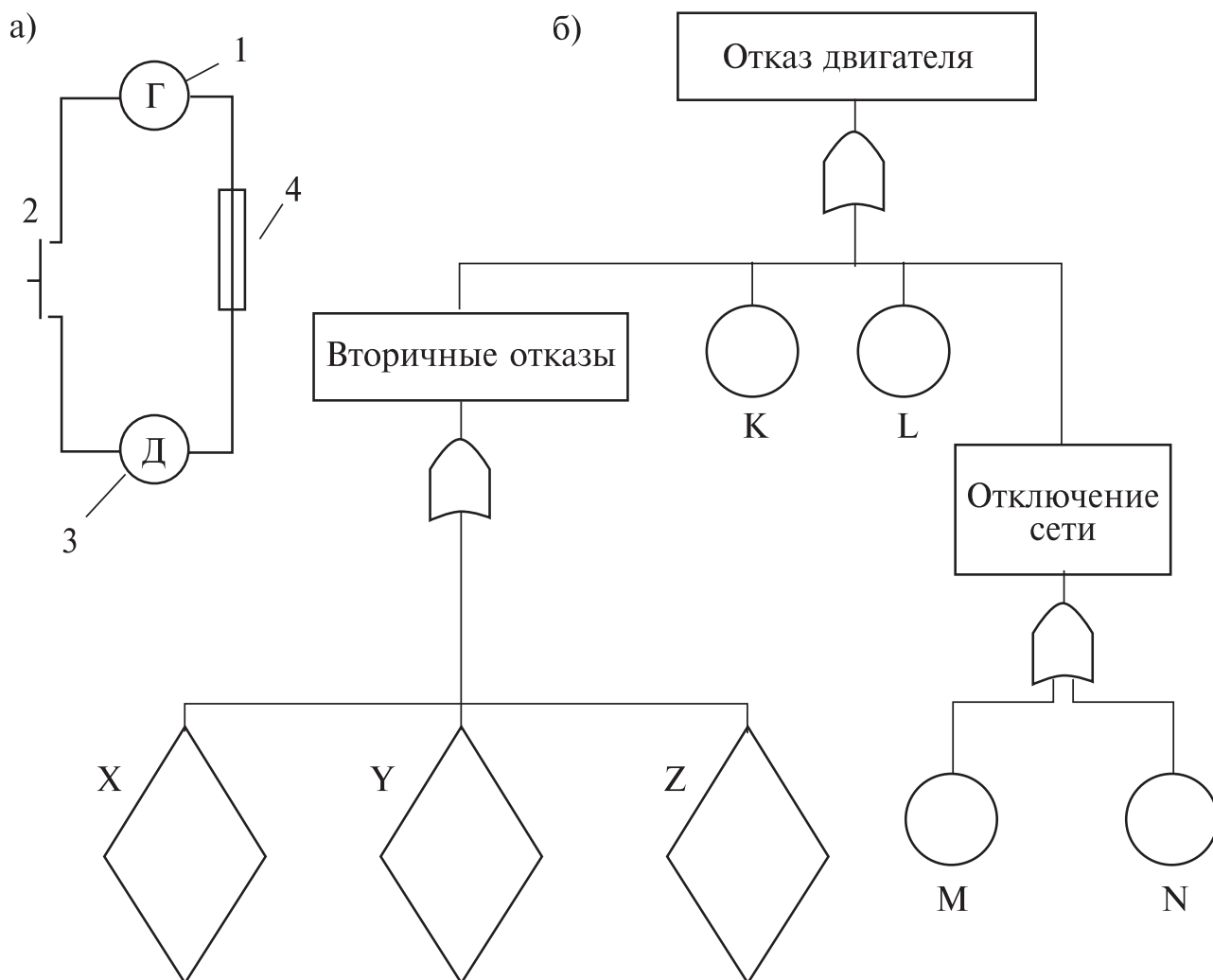


Рис. 6.16. Электрическая схема системы «генератор—двигатель» (а) и дерево (б) для случая вторичных отказов:

1 — генератор; 2 — выключатель; 3 — электродвигатель; 4 — предохранитель

Первичный отказ — это отказ самого двигателя (характеристики которого соответствуют техническим условиям), возникающий в результате естественного старения. Дерево отображает такие первичные события, как отказ выключателя (отсутствие замыкания) **К**, неисправности внутренних цепей обмотки двигателя **L**, сети питания **М** и предохранителя **N**.

Вторичные отказы возникают из-за причин, которые лежат за пределами, заданными техническими условиями, таких как:

- неправильное техническое обслуживание **X** (например, некондиционная смазка подшипников электродвигателя);
- аномальные условия эксплуатации **Y**, это может быть переработка (например, выключатель остался включенным после предыдущего запуска, что вызвало перегрев обмотки электродвигателя, который, в свою очередь, привел к короткому замыканию или обрыву цепи);
- воздействие на условия работы параметров внешней окружающей среды **Z** (например, внешняя катастрофа: пожар, наводнение и т. п.).

Вторичные отказы изображаются прямоугольником как промежуточное событие.

Случай инициированных отказов. Подобные *отказы возникают при правильном использовании элемента системы, но не в установленное время*. Другими словами, инициированные отказы — это сбои операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события. Типичным примером является *не приведение в действие* оператором какого-либо устройства управления (рис. 6.17).

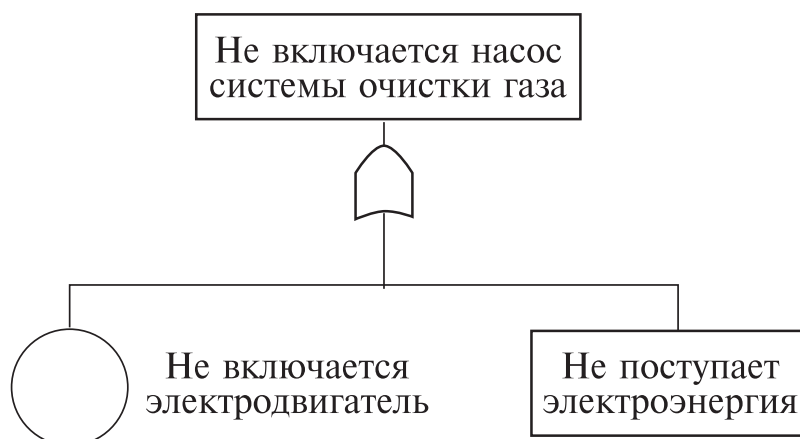


Рис. 6.17. Случай инициированного отказа: внесенная неисправность — «*не поступает электроэнергия*»

Множество деревьев. Для каждой системы возможны различные аварийные ситуации, для каждой из них строят дерево отказов. Впоследствии эти деревья могут быть и связаны. Аналогично, если одна система функционирует в различных режимах, то может понадобиться анализ деревьев отказов для каждого из режимов.

6.9. Дерево событий — ДС (Event Tree Analysis — ETA)

Дерево событий — алгоритм рассмотрения событий, исходящих от основного события (аварийной ситуации).

Дерево событий (ДС) используется для определения и анализа последовательности (вариантов) развития аварии, включающей сложные взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности. Вероятность каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения вероятности основного события на вероятность конечного события. При его построении используется прямая логика. Все значения P очень малы. Дерево не дает численных решений.

ПРИМЕР. Допустим, путем выполнения **ПАО** было выявлено, что критической частью реактора, т.е. подсистемой, с которой начинается риск, является система охлаждения реактора; таким образом, анализ начинается с просмотра последовательности возможных событий с момента разруше-

ния трубопровода холодильной установки, называемого инициирующим событием, вероятность которого равна P_A (рис. 6.18), т. е. авария начинается с разрушения (поломки) трубопровода — событие А. Далее анализируются возможные варианты развития событий (**В**, **С**, **Д** и **Е**), которые могут последовать за разрушением трубопровода. На рис. 6.18 изображено дерево исходных событий, отображающее все возможные альтернативы. На первой ветви рассматривается состояние электрического питания. Если питание есть, следующей подвергается анализу аварийная система охлаждения активной зоны реактора (АСОР). Отказ АСОР приводит к расплавлению топлива и к различным, в зависимости от целостности конструкции, утечкам радиоактивных продуктов.

Для анализа с использованием двоичной системы, в которой элементы либо выполняют свои функции, либо отказывают, число потенциальных отказов равно 2^{N-1} , где N — число рассматриваемых элементов. На практике исходное дерево можно упростить с помощью инженерной логики и свести к более простому дереву, изображенному в нижней части рис. 6.18. В первую очередь представляет интерес вопрос о наличии электрического питания. Вопрос заключается в том, какова вероятность P_B отказа электропитания и какое действие этот отказ оказывает на другие системы защиты. Если нет электрического питания, фактически никакие действия, предусмотренные на случай аварии с использованием для охлаждения активной зоны реактора распылителей, не могут производиться. В результате упрощенное дерево событий не содержит выбора в случае отсутствия электрического питания, и может произойти большая утечка, вероятность которой равна $P_A \times P_B$. В случае, если отказ в подаче электрической энергии зависит от поломки трубопровода системы охлаждения реактора, вероятность P_B следует подсчитывать как условную вероятность для учета этой зависимости. Если электрическое питание имеется, следующие варианты при анализе зависят от состояния АСОР. Она может работать или не работать, и ее отказ с вероятностью P_{CI} ведет к последовательности событий, изображенной на рис. 6.18. Следует обратить внимание на то, что по-прежнему имеются различные варианты развития аварии. Если система удаления радиоактивных материалов работоспособна, радиоактивные утечки меньше, чем в случае ее отказа. Конечно, отказ в общем случае ведет к последовательности событий с меньшей вероятностью, чем в случае работоспособности. Рассмотрев все варианты дерева, можно получить спектр возможных утечек и соответствующие вероятности для различных последовательностей развития аварии (рис. 6.19). Верхняя линия дерева является основным вариантом аварии реактора. При данной последовательности предполагается, что трубопровод разрушается, а все системы обеспечения безопасности сохраняют работоспособность.

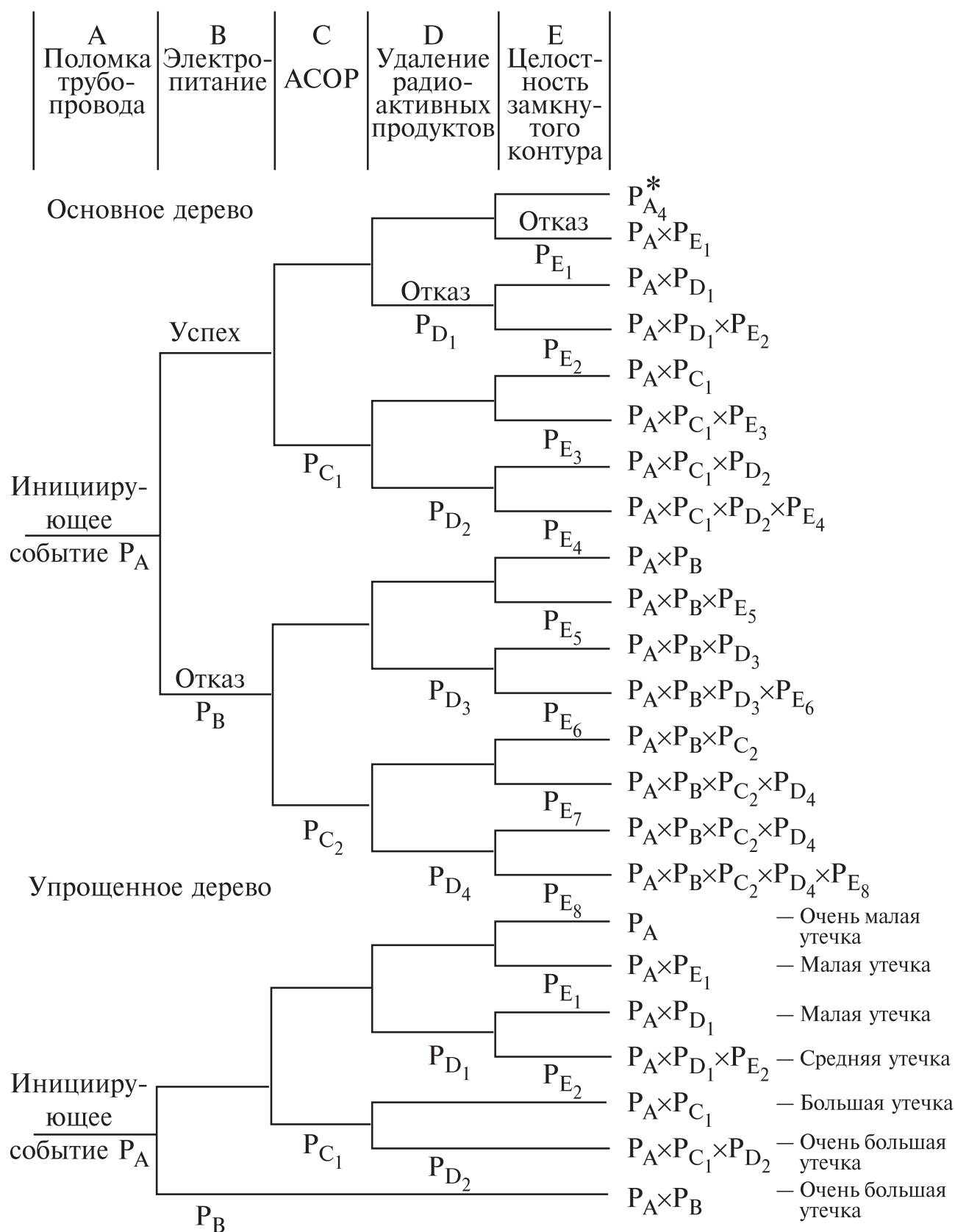


Рис. 6.18. Дерево событий

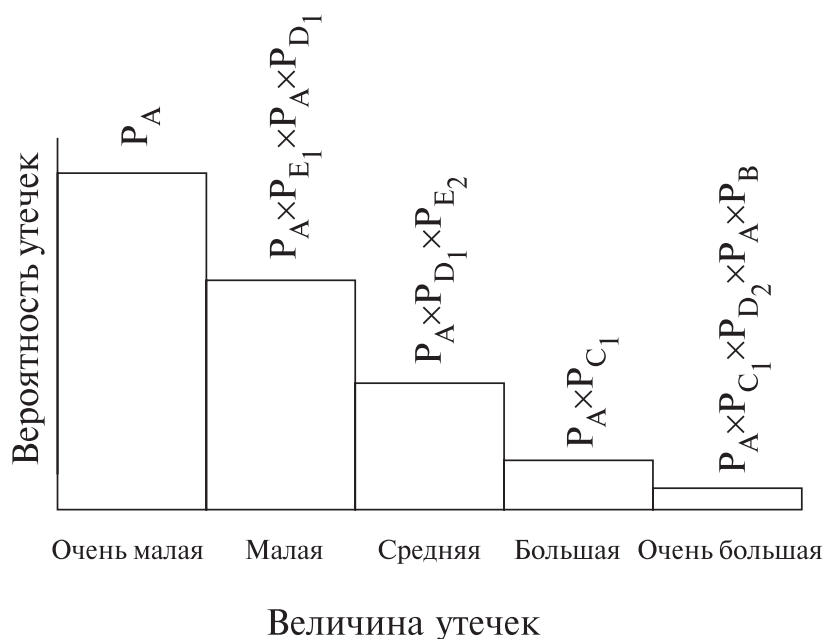


Рис. 6.19. Гистограмма вероятностей для различных величин утечек

6.10. Дерево решений

Дерево решений является разновидностью дерева событий. В дереве событий рабочие состояния системы не рассматриваются, так что сумма вероятностей всех событий не равна единице. В **дереве решений все возможные состояния системы необходимо выразить через состояния элементов**. Таким образом, все состояния системы взаимно увязаны, и их вероятность в сумме должна равняться единице. Деревья решений могут использоваться, если отказы всех элементов независимы или имеются элементы с несколькими возможными состояниями, а также есть односторонние зависимости. Они не могут использоваться при наличии двусторонних зависимостей и не обеспечивают логического анализа при выборе начальных событий.

ПРИМЕР. На рис. 6.20 показана система последовательно соединенных элементов, которая включает насос и клапан, имеющие соответственно вероятности безотказной работы 0,98 и 0,95, а также приведено дерево решений для этой системы. Следует отметить, что согласно принятому правилу верхняя ветвь соответствует желательному режиму работы системы, а нижняя — нежелательному. Дерево решений читается слева направо.

Если насос не работает, система отказывает независимо от состояния клапана. Если насос работает, с помощью второй узловой точки изучается вопрос, работает ли клапан.

Вероятность безотказной работы системы: $0,98 \times 0,95 = 0,931$. Вероятность отказа: $0,98 \times 0,05 + 0,02 = 0,069$, а суммарная вероятность двух состояний системы равна единице.

Этот результат можно получить другим способом с помощью **таблицы решения**, которая для насоса и клапана имеет вид:

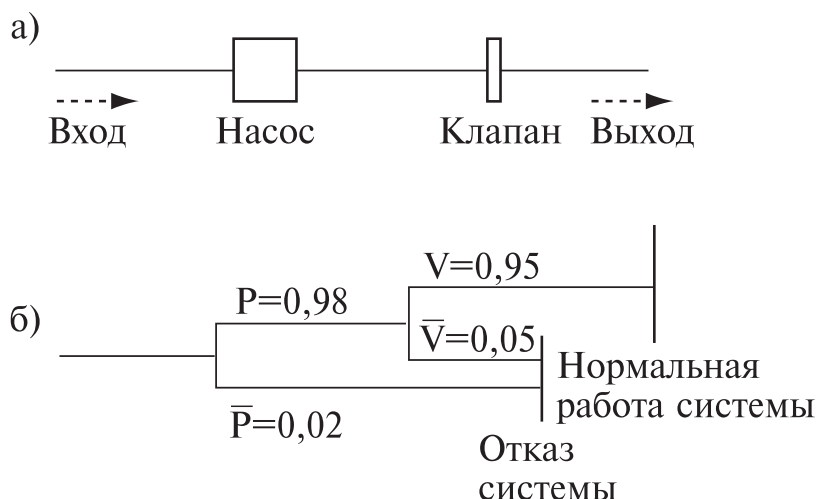


Рис. 6.20. Принципиальная схема (а) и дерево решений (б) для двухэлементной системы

Состояние насоса	Состояние клапана	Вероятность работоспособного состояния	Вероятность отказа системы
Работает	Работает	$0,98 \times 0,95$	
Отказ	Работает		$0,02 \times 0,95$
Работает	Отказ		$0,98 \times 0,05$
Отказ	Отказ		$0,02 \times 0,05$
Суммарная величина		0,931	0,069

6.11. Логический анализ

Логический анализ опасностей базируется на понятиях булевой алгебры (алгебры логики).

В алгебре логики переменные, обозначаемые заглавными буквами, имеют, как правило, смысл некоторых событий или факторов. Например, можно обозначить символом A событие, состоящее в повреждении какой-то части машины. Если это происходит, то мы говорим, что $A = T$ или что A истинно. Если это событие не происходит, говорим, что $A = F$ или что A ложно. Такие высказывания справедливы для некоторого определенного интервала времени и вероятности, связанной с появлением события. Переменные в алгебре логики принимают два значения: истина или ложь (появление или неоявление). Аналогично и функции принимают два значения в зависимости от комбинации логических переменных. Функции образуются с помощью операций **И**, **ИЛИ** и **НЕ**. Смысл этих операций определяется таблицами истинности.

Истинное значение функции задается значениями переменных, входящих в нее. Например, пусть функция A имеет вид:

$$A = BC + D\bar{E}.$$

Чтобы определить истинное значение A , надо знать истинные значения четырех переменных. Вычисление значения отдельных членов ведется в порядке: (1) НЕ, (2) И и (3) ИЛИ. Таким образом, если $B = \text{ЛОЖЬ}$, $C = \text{ИСТИНА}$, $D = \text{ИСТИНА}$ и $E = \text{ЛОЖЬ}$, то, используя таблицы, получим:

$$A = FT + T\bar{F} = FT + TT = F + T = T.$$

Оператор И			Оператор ИЛИ			Оператор НЕ	
X	Y	$XY (X \text{ И } Y)$	X	Y	$X+Y (X \text{ ИЛИ } Y)$	X	$\bar{X} (\text{НЕ } X)$
T	T	T	T	T	T	T	F
T	F	F	T	F	T	F	T
F	T	F	F	T	T		
F	F	F	F	F	F		

Порядок вычисления операций может быть изменен применением скобок, причем выражения внутренних скобок вычисляются первыми. Например:

$$A = B((C + D)\bar{E}) = F((T + T)\bar{F}) = F(T\bar{F}) = F\bar{F} = FT = F.$$

При определенных навыках такие вычисления производятся достаточно быстро.

Особый интерес представляет применение алгебры логики для анализа предполагаемых производственных опасностей.

ПРИМЕР 1. На новой машине имеется цепной привод, который хоть и имеет защитное устройство, но в данном режиме работы должен быть убран. В нормальном режиме сама цепь работает с большим напряжением. Поэтому можно ожидать, что она быстро изнашивается и периодически рвется. Частицы от другого оборудования, попадая в цепь, также могут привести к ее обрыву. В случае обрыва цепи имеющееся защитное устройство, в зависимости от обстоятельств, может не обеспечить защиту рабочего.

Логическими переменными в этом случае будут:

A — защита цепи убрана;

B — цепь изнашивается и рвется;

C — технологические частицы приводят к обрыву цепи;

D — защита достаточна, чтобы защитить рабочего в любом случае.

X — соответствует наличию опасной ситуации.

Логическая операция примет вид:

$$X = A + \bar{D}B + \bar{D}C \text{ или } X = A + (B + C)\bar{D}.$$

Для предотвращения опасной ситуации нужно, чтобы величина X не стала истиной. Это имеет место, когда A ложно, D истинно или и B и C ложны одновременно.

Приведем еще пример использования принципов алгебры логики. В частности, применим отождествление истинного события с единицей, а ложного с нулем.

ПРИМЕР 2. При строительстве здания компрессорной станции проводились отделочные работы. Бригада отделочников, численностью пять человек, работала на лесах на высоте 3 м от нулевой отметки. При установке бадьи с раствором леса обрушились. Четыре человека были травмированы. Очевидцы несчастного случая, пострадавшие и должностные лица дали показания, на основании которых были выделены основные факторы несчастного случая.

Обозначим эти факторы логическими переменными (заглавными буквами):

A — леса удовлетворяли техническим условиям (ТУ) и правилам техники безопасности (ПТБ);

B — крановщик был нездоров;

C — нагрузка на леса удовлетворяла ТУ и ПТБ;

D — кран был неисправен;

E — на леса был установлен слишком тяжелый груз;

F — в момент опускания груза производился поворот стрелы;

G — перед началом работы крановщик осмотрел кран;

H — перед началом работы мастер осмотрел леса.

Анализ причин несчастного случая (отказа) при помощи булевых функций выполняют следующим образом. Установив факторы несчастного случая (НС) составляется матричная форма (табл. 6.8) для его описания. Если очевидец утверждает, что данный фактор имел место, в соответствующую графу заносят «1», если нет, то «0», при отсутствии адекватной информации делают прочерк «—». Затем составляют функцию алгебры логики ($F_{ал}$). Для каждого очевидца определяют свою конъюнкцию. Если фактор имел место, то букву записывают в утвердительном значении; если нет — в виде инверсий; при «—» букву опускают. Полученную функцию минимизируют перебором всех эквивалентных формул (либо применяя соответствующие методы) и подвергают анализу, при котором устанавливают основные причины несчастного случая и сопутствующие им факторы.

Искомую $F_{ал}$, для которой X — несчастный случай, запишем в виде:

$$X = \overline{A}BDH + ACDE + \overline{B}DF + \overline{A}BDG\overline{H} + \overline{B}D\overline{H} + \overline{A}BDF + \overline{B}F\overline{H}.$$

Минимальная формула будет иметь вид:

$$X = \overline{B}DF + \overline{B}D + ACDE + \overline{D}FH.$$

Если несчастный случай произошел, то $X = 1$, т. е. имеет место одна из четырех альтернатив:

- крановщик не был здоров, кран был исправен, был поворот стрелы в момент опускания груза;
- крановщик был здоров, кран был неисправен;

Таблица 6.8

Подготовка данных для составления $F_{ал}$

Очевидец	Фактор							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	0	—	1	—	—	—	1
2	1	—	1	1	0	—	—	—
3	—	1	—	0	—	1	—	—
4	0	0	—	1	—	—	1	0
5	—	0	—	1	—	—	—	0
6	0	0	—	1	—	1	—	—
7	—	0	—	—	—	0	—	1

- леса удовлетворяли ТУ и ПТБ, нагрузка на леса удовлетворяла ТУ и ПТБ, груз был установлен на леса в соответствии с требованиями ПТБ;
- кран был исправен, был поворот стрелы в момент опускания груза, мастер осмотрел леса перед началом работы.

Из примеров очевидно, что алгебра логики не отвечает на поставленный вопрос, но дает возможность поставить задачу так, что решение может быть принято при минимальной трудоемкости последующего анализа и сократить количество рассматриваемых подсистем.

6.12. Контрольные карты процессов

Контрольные карты используются для визуального обнаружения нарушений технологического процесса по измеренным значениям выходной переменной на основе сопоставления ее статистических характеристик с допустимыми (контрольными) пределами. В качестве результатов измерений, наносимых на карты, могут служить любые переменные. Это могут быть скачки потребления электрической мощности, давления, температуры, вибрации и т. д. Построение контрольных карт, в частности определение контрольных пределов, основано на методе проверки статистических гипотез.

Изменения выходной переменной y объекта могут быть вызваны, **во-первых**, случайными внешними и внутренними возмущающими воздействиями, характерными для нормальной эксплуатации, **во-вторых**, различного рода нарушениями в работе систем (подсистем, элементов) и ошибочными действиями оператора.

Если переменная y изменяется под влиянием причин только первого вида, то процесс находится под статистическим контролем или в статистически подконтрольном состоянии, т. е. случайные колебания y подчиняются одному и тому же закону распределения вероятности. В случае же появ-

ления причин второго вида процесс выходит из под контроля (находится вне статистического контроля).

На практике наиболее распространены контрольные карты средних значений (карта $\bar{y}$), средних геометрических, накопленных сумм, индивидуальных значений y , медиан y_m ; комбинированные контрольные карты $(\bar{y}, \sigma_y)$, (y, R_y) , (y_m, R_y) и др. (где σ_y , R_y — соответственно среднее квадратическое отклонение и размах распределения случайной величины y).

Применяемые в картах числовые характеристики случайной величины y рассчитывают по измеренным значениям $y_{i,1}; y_{i,2}; \dots; y_{i,N}$ в последовательные моменты времени t_i , $i = 1, 2, \dots$ по методам математической статистики.

На рис 6.21 и 6.22 приведены карта средних значений и карта $(\bar{y}, R_y)$. Точками отмечены средние значения $\bar{y}_i$ в моменты времени t_i , $i = 1, 2, \dots$; m_y — математическое ожидание распределения случайной величины y . Процесс находится под статистическим контролем, т. е. соответствует нормальному функционированию, если значения $\bar{y}_i$ находятся между нижней $y_{\text{гп}}^H$ и верхней $y_{\text{гп}}^G$ контрольными границами (пределами). Линии $y_{\text{гп}}^H$ и $y_{\text{гп}}^G$ проводят с учетом предполагаемого (допустимого) распределения y или вводят с помощью непараметрического анализа. Когда значение $\bar{y}_i$ выходит за контрольные пределы, это свидетельствует о появлении каких-либо аномальных изменениях в технологическом процессе.

Построение контрольных карт, в частности определение контрольных пределов, основано на методе проверки статистических гипотез.

Различают нулевые и альтернативные гипотезы. К нулевым гипотезам χ_0 относят предложения о равенстве нулю статистических показателей при отсутствии различия между сравниваемыми параметрами, например, между оценкой среднего $\bar{y}$ и значением математического ожидания m_y распределения случайной величины y . Незначительные отклонения $\bar{y}$ от m_y при правильной гипотезы χ_0 могут быть вызваны случайными колебаниями в выборках.

К альтернативным гипотезам χ_i , $i = 1, 2, \dots$ относятся все остальные гипотезы. Например, нулевой гипотезе о равенстве нулю разности $(\bar{y} - m_y)$ можно сопоставить две альтернативные: $\chi_1 - (\bar{y} - m_y) > 0$ и $\chi_2 - (\bar{y} - m_y) < 0$.

Контрольные границы для карт процессов определяют в следующей последовательности:

1. Выдвигают нулевую χ_0 и одну χ_1 или две χ_1, χ_2 альтернативные гипотезы;
2. Выбирают критическую статистику s ;
3. Устанавливают уровень значимости α 100 %;
4. По таблице квантилей, или процентных точек, находят граничное значение $s_{\text{гп}}$ (или $s_{\text{гп}}^H, s_{\text{гп}}^G$), соответствующее выбранному уровню значимости и числу замеров N ;
5. По формуле связи критической статистики s с оцениваемым параметром рассчитывают контрольные границы.

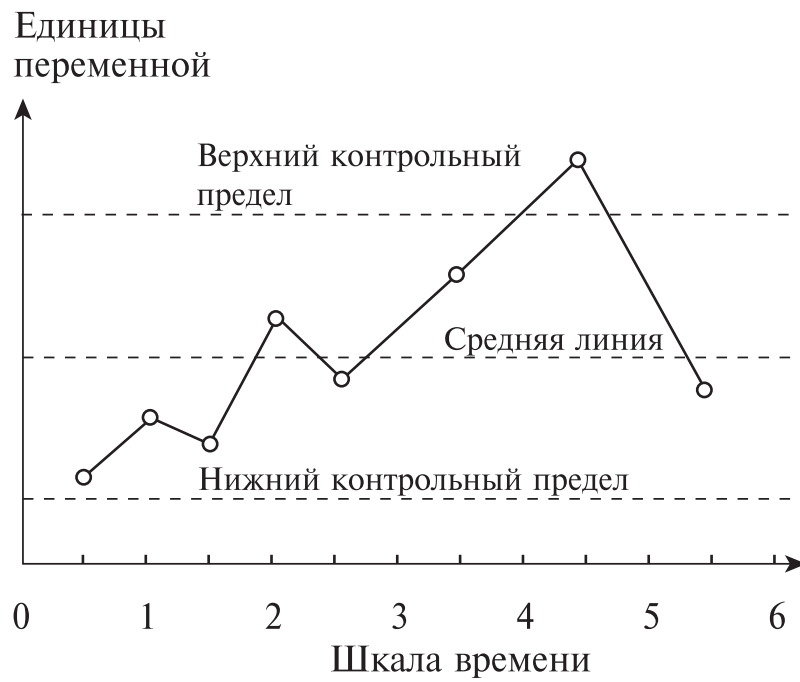


Рис. 6.21. Пример контрольной карты

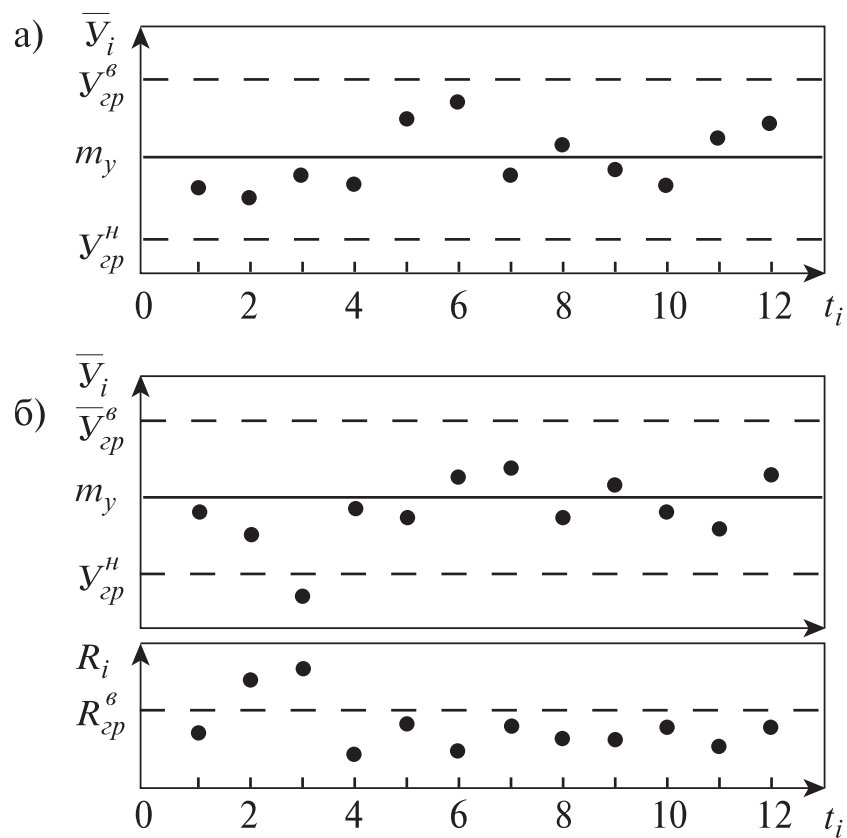


Рис. 6.22. Контрольные карты процессов:
а — карта средних значений; б — карта $(\bar{y}, R_y)$

Рекомендации по использованию контрольных карт в разных условиях приведены в табл. 6.9.

Таблица 6.9

Условия применения контрольных карт

Причина изменения процесса	Среднее $\bar{y}$	Размах R	Стандартное отклонение σ_y	Накопленная сумма
Грубое отклонение	1	2	—	3
Сдвиг среднего	2	—	3	1
Сдвиг дисперсии	—	1	—	—
Тренд *	2	—	—	1
Колебание	—	1	2	—

Условные обозначения: «—» — неприменима; 1, 2, 3 — место в ранжированном ряду применения (1 — наиболее предпочтительная карта и т. д.);

* систематическое увеличение (уменьшение) средних значений.

6.13. Распознавание образов

Одно из направлений развития методов контроля надежности элементов системы (или систем), основанных на изучении косвенных параметров, — использование теории распознавания образов. В ней разрабатываются приемы и методы, позволяющие по некоторым, часто весьма незначительным, признакам относить объект изучения к тому или иному классу и охарактеризовать его состояние.

Кластерный анализ — математическая процедура многомерного анализа, позволяющая на основе множества показателей, характеризующих ряд состояний объектов (образов), сгруппировать их в классы (**кластеры**) таким образом, чтобы объекты, входящие в один класс (образ), были более однородными, сходными по сравнению с объектами, входящими в другие классы. На основе численно выраженных параметров объектов вычисляются расстояния между ними, которые могут выражаться в евклидовой метрике (наиболее употребимой), так и в других метриках.

Кластерный анализ применяют для идентификации опасных состояний системы в том случае, если нарушения в объекте существенно изменяют зависимости выходных переменных от входных воздействий или областей значений переменных.

Обнаружение и диагностирование нарушений при кластерном анализе производят на основе идентификации некоторого образа — кластера — в пространстве нескольких переменных $y_1, y_2, \dots, y_L$, соответствующего определенному состоянию работоспособности h , по данным измерения этих переменных. Примеры трех кластеров в области измеряемых значений

y_1 и y_2 для состояний работоспособности h_0, h_1, h_2 показаны на рис. 6.23. **Границы кластеров определяют на основе обработки экспериментальных данных, полученных в различных и известных состояниях работоспособности.**

Выделение кластеров отражает различие параметров или вида оператора ϕ модели объекта при разных состояниях работоспособности, разброс значений y в одном состоянии работоспособности характеризует изменение возмущающих воздействий.

Каждому кластеру соответствует многомерная плотность распределения $p(y_1, y_2, \dots, y_L)$. Если измеряемые переменные независимы, то функция $p(y_1, y_2, \dots, y_L)$ равна произведению плотностей распределений $p(y_i)$ переменных $y_i, i = \overline{1, L}$:

$$p(y_1, y_2, \dots, y_L) = kp(y_1)p(y_2)\dots p(y_L),$$

где: k — доля общей совокупности точек, занимаемая данным кластером, $k \in [0; 1]$.

Чтобы охарактеризовать кластер по экспериментальным данным, в простейшем случае оценивают параметры распределения математического ожидания m_i , среднего квадратического отклонения σ_i переменной $y_i, i = \overline{1, L}$, соответствующие одному состоянию работоспособности, а следовательно, и кластеру, определяют его границу как границу области с назначенной доверительной вероятностью. Если переменные y_i независимы и распределены по нормальному закону, то главные оси кластеров расположены параллельно координатным осям.

Нарушения методами кластерного анализа выявляют следующим образом. В момент времени t_j производят очередное j -е измерение вектора $y[j] = (y_1[j], \dots, y_L[j])$. На основе взаимного расположения точки $y[j]$ кластеров в L -мерном пространстве определяют состояние работоспособности $h[j]$ в момент времени t_j . Решение принимают на основе вычисления обобщенного расстояния от проверяемой точки $y[j]$ до центров кластеров. В случае независимости переменных и нормальных распределений обобщенное расстояние ρ_h до h -го кластера определяют по формуле:

$$\rho_h = \left(\sum_{i=1}^L \left(\frac{y_i[j] - m_i^h}{\sigma_i^h} \right)^2 \right)^{1/2}, \quad (6.13.1)$$

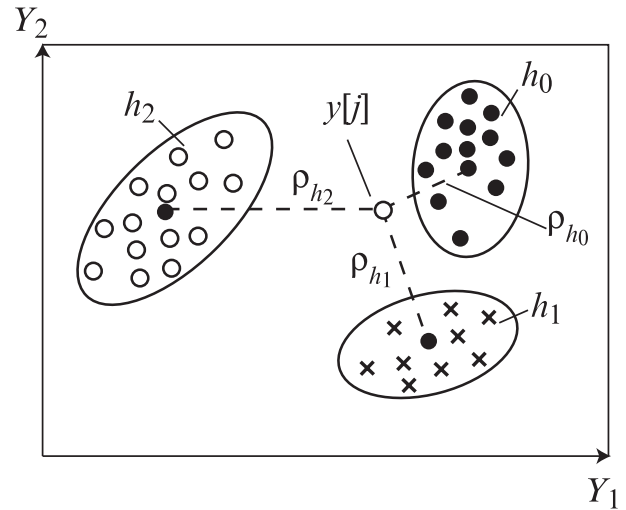


Рис. 6.23. Кластеры в пространстве двух переменных для трех состояний работоспособности

где: $y_i[j]$ — значение компоненты y_i вектора $y[j]$;
 m_i^h, σ_i^h — параметры распределения $\pi_h(y_1, \dots, y_L)$ кластера, соответствующего состоянию h объекта.

Точка $y[j]$ относится к тому кластеру, для которого расстояние ρ_h минимально.

Можно также использовать модифицированное обобщенное расстояние ρ_h'' , учитывающее фактор k и определяемое по формуле:

$$\rho_h'' = \sqrt{\rho_h^2 - 2 \ln k_h}, \quad k_h = \frac{k_h}{\sigma_1^h \sigma_2^h \dots \sigma_L^h (2\pi)^{L/2}}, \quad (6.13.2)$$

где: k_h — фактор k для кластера, соответствующего состоянию h .

ПРИМЕР. Объект — химический реактор; контролируются переменные: y_1 — температура, y_2 — концентрация компонента **A**, y_3 — концентрация компонента **B**, y_4 — давление; выделены три кластера, соответствующие состояниям: h_0 — нормальное функционирование, h_1 — нарушена подача хладагента, h_2 — не работает мешалка, с параметрами $m_1^0 = 195, \sigma_1^0 = 10, m_2^0 = 80, \sigma_2^0 = 5, m_3^0 = 10, \sigma_3^0 = 2, m_4^0 = 5, \sigma_4^0 = 0,5; m_1^1 = 250, \sigma_1^1 = 20, m_2^1 = 70, \sigma_2^1 = 5, m_3^1 = 15, \sigma_3^1 = 3, m_4^1 = 4,8, \sigma_4^1 = 0,5; m_1^{(2)} = 190, \sigma_1^{(2)} = 15, m_2^{(2)} = 60, \sigma_2^{(2)} = 7,5, m_3^{(2)} = 22, \sigma_3^{(2)} = 5, m_4^{(2)} = 4,7, \sigma_4^{(2)} = 0,6$ (где σ_i, m_i — среднее квадратическое отклонение и математическое ожидание i -й переменной для v -го кластера).

При очередном j -м измерении вектора y получены:

$$y[j] = (y_1[j] = 220, y_2[j] = 75, y_3[j] = 12, y_4[j] = 4,9),$$

обобщенные расстояния ρ_h , вычисленные согласно (6.12.1), которые равны: $\rho_{h_0} = 2,88, \rho_{h_1} = 2,06, \rho_{h_2} = 3,48$. Расстояние ρ_{h_1} минимально, поэтому $y[j]$ соответствует состоянию h_1 .

В ряде случаев пространство значений вектора y содержит определенный кластер. В зависимости от того, какому сектору принадлежит точка $y[j]$, делают вывод о принадлежности ее к соответствующему кластеру, а следовательно, о том, какое состояние работоспособности и нарушение имеет место в рассматриваемый период времени.

Классификационные (разделяющие) линии или функции, которые делят область наблюдаемых значений y на части, соответствующие различным состояниям работоспособности, определяют методами дискриминационного анализа и распознавания образов, например методами случайных плоскостей, потенциальных функций, которые реализуются на ЭВМ.

ПРИМЕР. Имеются два информативных признака: y_1, y_2 , по значениям которых определяют состояние или образ объекта. Возможны два состояния работоспособности: h_0 и h_1 . Линия L делит область значений $y = (y_1, y_2)$ на две части: Y_0 и Y_1 ; если $y \in Y_0$, то имеет место состояние h_0 , если $y \in Y_1$, то — h_1 . В общем случае L — разделяющая плоскость.

Алгоритм построения линии L методом случайной плоскости содержит два этапа и заключается в следующем. На первом этапе проводится серия частных разделяющих линий $L_i, i = 1, 2, \dots$. Для этого берут два первых значения y , принадлежащих разным образам, например $y[1] \in Y_0$ и $y[2] \in Y_1$, и проводят произвольную линию L_1 , разделяющую точки $y[1]$ и $y[2]$ (рис. 6.24, а). Берут следующее значение $y[3]$, для определенности пусть $y[3] \in Y_1$. Если $y[3]$ и $y[2]$ лежат в одной полуплоскости относительно L_1 , то новой линии не проводят; если же $y[3]$ находится в одной полуплоскости с $y[1] \in Y_0$, то проводят линию L_2 , отделяющую $y[3]$ от $y[1]$ (рис. 6.24, б). Далее рассматривают значение $y[4]$. При $y[4] \in Y_0$ проводят линию L_3 , отделяющую $y[4]$ от $y[2] \in Y_1$ (рис. 6.24, в), и т. д. Первый этап заканчивается, когда будут введены все значения $y[j]$, предназначенные для построения разделяющей линии. На втором этапе стирают те участки частных линий L_i , по обе стороны которых имеются одноименные точки, оставшиеся участки образуют разделяющую линию L (рис. 6.24, г).

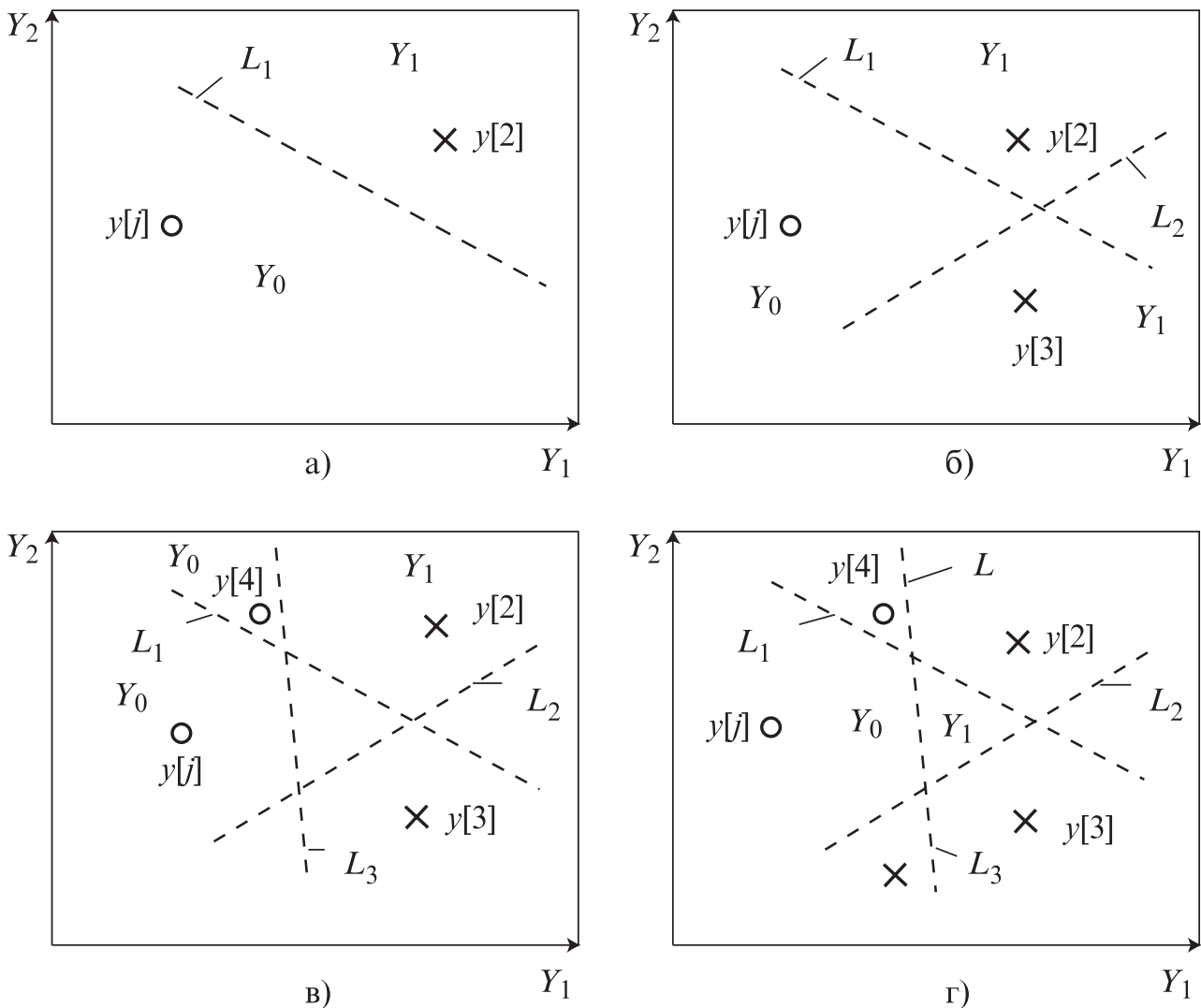


Рис. 6.24. Схемы построения разделяющей линии методом случайных плоскостей:

а — два измерения; *б* — три измерения; *в* — четыре измерения;
г — разделяющая линия L : o — измерения $y[j] \in Y_0$; x — измерения $y[i] \in Y_1$

В случаях, когда нельзя указать резкие границы, отделяющие области значений y , соответствующие различным состояниям работоспособности, используют математический аппарат нечетких множеств. В нечетком множестве его элементы имеют различную степень принадлежности к данному множеству. Это объясняется невозможностью полного и четкого описания различных ситуаций, неточностью измерения входных и выходных переменных объекта и т. д.

Нечеткое множество A элементов некоторого множества Y определяют как совокупность упорядоченных пар (кортежей), составленных из элементов $y \in Y$ и степеней принадлежности $\mu_A(y) \in [0; 1]$, т. е. $A = \{ \langle y, \mu_A(y) \rangle, y \in Y, \mu_A(y) \in [0; 1] \}$ (где Y — область определения принадлежности μ_A).

Чем выше значение $\mu_A(y)$, тем больше элемент y соответствует множеству A .

Например, y — температура в работающем химическом реакторе, $y \in Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}$, $y_i < y_{i+1}$; A — нечеткое множество значений температур, соответствующих аварийной ситуации, равное

$$A = \{(y_1; 0), (y_2; 0), (y_3; 0,3), (y_4; 0,9), (y_5; 1)\}.$$

Данное множество означает, что температуры y_1, y_2 не соответствуют аварийной ситуации, y_3 — мало соответствует, y_4 — вполне соответствует, а при температуре y_5 аварийная ситуация не вызывает сомнения.

Теория нечетких множеств позволяет создавать автоматизированные системы предотвращения аварий, с помощью которых на основе информации с большой неопределенностью, нечетких действий и команд операторов определяют аварийную обстановку и выполняют необходимые защитные действия.

6.14. Таблицы состояний и аварийных сочетаний

Безаварийность системы можно повысить, постоянно замеряя переменные технологического объекта с последующим определением состояния работоспособности, его места на дереве отказа. По достижению объектом угрожающих (предаварийных) состояний своевременно принимают необходимые защитные меры. Для этого широко используют таблицы состояний и аварийных сочетаний.

При разработке таблицы определяют измеряемые переменные, устанавливают пределы их измерения (уровни), выбирают виды входных воздействий, при которых измеряются переменные, составляют перечень ситуаций, образуемых сочетаниями и значениями измеряемых переменных, определяют возможные отказы (нарушения) элементов объекта, устанавливают соответствие между ситуациями и отказами, строят дерево решений, выбирают вид и заполняют таблицу решений, проводят работы по компактному представлению таблицы.

Например, в аппарате контролируются давление (y_1) и температура (y_2). Переменная y_1 может находиться на двух уровнях: «0» — нормальное значение, «+» — завышенное значение, а переменная y_2 на трех уровнях: «0», «+» и «-» (заниженное значение). В этом случае число возможных ситуаций равно шести (2×3): ситуация I — $y_1 = 0, y_2 = 0$, т. е. (0; 0); ситуация II — (0; +) и т. д. (табл. 6.10). Основные нарушения элементов объекта: 1 — отказ регулятора давления, 2 — отказ регулятора температуры, 3 — отказ регулятора расхода, 4 — не подается пар в рубашку.

Таблица 6.10

Таблица решений по значениям двух переменных

Ситуация	I	II	III	IV	V	VI
Переменные						
y_1	0	0	0	+	+	+
y_2	0	+	-	0	+	-
Отказы (диагноз)	h_0	2	4	1	1,2	3

Соответствие между ситуациями и отказами отражается на дереве состояний (рис. 6.25). При его построении из начальной вершины (нулевой уровень) проводят ребра, соответствующие значениям переменной y_1 , из вершины следующего уровня — значениям переменной y_2 . После рассмотрения всех переменных образуются вершины, соответствующие возможным ситуациям, они пунктиром связаны с отказами объекта.

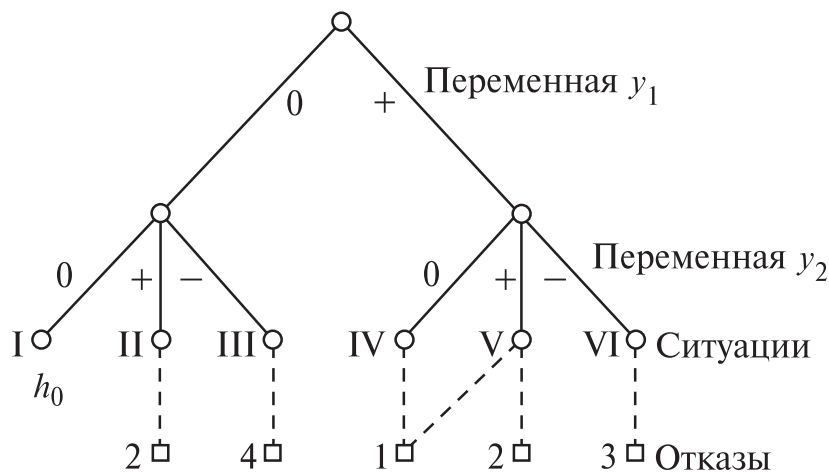


Рис. 6.25. Дерево состояний

Преобразование таблицы состояний к компактному виду рассмотрим на примере системы контроля и управления промежуточной емкостью (рис. 6.26). Приборы 1, 2 контролируют скорости входного F_1 и выходного F_2 потоков, регулятор 3 поддерживает постоянный уровень в емкости с помощью вентиля 4. Измеряемыми переменными являются F_1, F_2 (показания приборов 1, 2) и положение В вентиля 4. Каждая переменная может находиться на трех уровнях: «0» — нормальном; «+» — высоком (вентиль открыт) и «-» — низком (вентиль закрыт). Таким образом, число ситуаций (табл. 6.11) равно $3^3 = 27$.

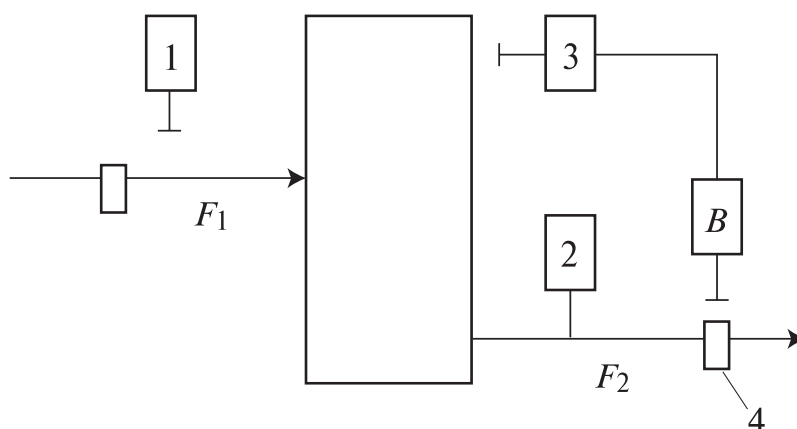


Рис. 6.26. Схема системы контроля и управления промежуточной емкостью

Таблица 6.11

Таблица решений по значениям трех переменных

Ситуация	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Переменные														
F_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+
B	0	0	0	+	+	+	—	—	—	0	0	0	+	+
F_2	0	+	—	0	+	—	0	+	—	0	+	—	0	+
Отказы	h_0	2	4	4	A	4	2	2	5	5	2	4	4	6
(диагноз)		3					3	3			3			
Ситуация	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Переменные														
F_1	+	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B	+	—	—	—	0	0	0	+	+	+	—	—	—	—
F_2	—	0	+	—	0	+	—	0	+	—	0	+	—	—
Отказы	4	2	2	5	A	2	4	4	A	4	2	2	6	
(диагноз)		3	3			3					3	3		

При функционировании объекта наиболее вероятны следующие нарушения: 2 — течь трубопровода на участке 2—4, 3 — ошибочно открытый байпас вентиля 4 (см. рис. 6.26), 4 — забита выходная труба, 5 — течь емкости, 6 — ненормальная производительность и A — аномалия, т. е. невозможная комбинация результатов измерения, с точки зрения принципа работы, ошибочные измерения.

Некоторые ситуации соответствуют одним и тем же отказам, их можно объединить. Так, в ситуациях 2, 11, 20 при различных значениях F_1 одинаковый вывод — нарушения 2, 3. Это позволяет объединить три ситуации, отметив значение F_1 знаком L — любое. Результаты объединения ситуаций приведены в табл. 6.12.

Таблица 6.12

Таблица решений с объединенными ситуациями

Ситуация	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Переменные															
F_1	0	Л	Л	Л	+	Л	Л	Л	0	+	–	+	–	–	0
V	0	0	0	+	+	+	–	–	–	–	–	0	0	+	+
F_2	0	+	–	0	+	–	0	+	–	–	–	–	+	0	+
Отказы	h_0	2	4	4	6	4	2	2	5	5	5	5	A	A	A
(диагноз)		3					3	3							

Применение таблицы решений позволяет контролировать развитие аварии, начиная от состояния нормального функционирования, когда все измеряемые переменные находятся в допустимых пределах. Сначала отклоняется от нормы значение одной переменной, затем двух и т. д. С помощью таблицы по значениям переменных определяют конкретные ситуации, а следовательно, и соответствующие им отказы, что позволяет их устранять и принимать меры для предотвращения аварий.

Таблицы решений используют также для автоматизации построения дерева отказов, наряду с ними широко распространены таблицы аварийных сочетаний.

Г Л А В А 7

Оценка надежности человека как звена сложной технической системы

7.1. Причины совершения ошибок

Технические системы становятся взаимосвязанными только благодаря наличию такого основного звена, как человек. Примерно 20—30 % отказов прямо или косвенно связаны с ошибками человека; 10—15 % всех отказов непосредственно связаны с ошибками человека. По мнению академика В. А. Легасова, свыше 60 % аварий происходит из-за ошибок персонала «рисковых» объектов.

Ввиду этого анализ надежности реальных систем должен обязательно включать и человеческий фактор.

Надежность работы человека определяется как вероятность успешного выполнения им работы или поставленной задачи на заданном этапе функционирования системы в течение заданного интервала времени при определенных требованиях к продолжительности выполнения работы.

Ошибка человека определяется как невыполнение поставленной задачи (или выполнение запрещенного действия), которое может явиться причиной повреждения оборудования или имущества либо нарушения нормального хода запланированных операций.

В реальных условиях в большинстве систем независимо от степени их автоматизации требуется в той или иной мере участие человека.

Можно утверждать, что там, где работает человек, появляются ошибки. Они возникают независимо от уровня подготовки, квалификации или опыта. Поэтому прогнозирование надежности оборудования без учета надежности работы человека не может дать истинной картины.

Ошибки по вине человека могут возникнуть в тех случаях, когда:

- оператор или какое-либо лицо стремится к достижению ошибочной цели;
- поставленная цель не может быть достигнута из-за неправильных действий оператора;

— оператор бездействует в тот момент, когда его участие необходимо.

Виды ошибок, допускаемых человеком на различных стадиях взаимодействия в системе «человек—машина», можно классифицировать следующим образом.

1. Ошибки проектирования: обусловлены неудовлетворительным качеством проектирования. Например, управляющие устройства и индикаторы могут быть расположены настолько далеко друг от друга, что оператор будет испытывать затруднения при одновременном пользовании ими.

2. Операторские ошибки: возникают при неправильном выполнении обслуживающим персоналом установленных процедур или в тех случаях, когда правильные процедуры вообще не предусмотрены.

3. Ошибки изготовления: имеют место на этапе производства вследствие (а) неудовлетворительного качества работы, например неправильной сварки, (б) неправильного выбора материала, (в) изготовления изделия с отклонениями от конструкторской документации.

4. Ошибки технического обслуживания: возникают в процессе эксплуатации и обычно вызваны некачественным ремонтом оборудования или неправильным монтажом вследствие недостаточной подготовленности обслуживающего персонала, неудовлетворительного оснащения необходимой аппаратурой и инструментами.

5. Внесенные ошибки: как правило, это ошибки, для которых трудно установить причину их возникновения, т. е. определить, возникли они по вине человека или же связаны с оборудованием.

6. Ошибки контроля: связаны с ошибочной приемкой как годного элемента или устройства, характеристики которого выходят за пределы допусков, либо с ошибочной отбраковкой годного устройства или элемента с характеристиками в пределах допусков.

7. Ошибки обращения: возникают вследствие неудовлетворительного хранения изделий или их транспортировки с отклонениями от рекомендаций изготовителя.

8. Ошибки организации рабочего места: теснота рабочего помещения, повышенная температура, шум, недостаточная освещенность и т. п.

9. Ошибки управления коллективом: недостаточное стимулирование специалистов, их психологическая несовместимость, не позволяющие достигнуть оптимального качества работы.

Свойство человека ошибаться является функцией его психофизиологического состояния. Интенсивность ошибок во многом определяется параметрами внешней среды, в которой человек работает.

В основе всех перечисленных причин лежат психологические мотивы поведения человека в разных ситуациях. Отдельные лица представляют и руководящее звено, и операторское звено, и ремонтный персонал, и т. п. Подходы к проблемам безопасности у них будут разные, разными будут и результаты. Поведение отдельных лиц и их влияние на безопасность систем будет различным на разных ступенях технологической цепочки созда-

ния объекта (выбор площадки, разработка технико-экономического обоснования, конструкторские проекты, изготовление оборудования, строительство объекта, монтаж, наладка, эксплуатация, контроль и т. п.).

Одновременно персонал рискованных объектов испытывает большую психологическую нагрузку. Факторы, ее обуславливающие, можно рассмотреть на примере [64] работы оперативного персонала традиционной промышленной электростанции: осознание степени опасности и тяжести последствий аварии; высокое давление пара и воды, высокое электрическое напряжение; движущиеся механизмы; вибрация; повышенная температура и пониженная влажность воздуха; монотонность обстановки; медленные изменения показаний приборов; размеренный ритм работы оборудования.

Следствия: расстройство сознания, рост психологической напряженности, потеря бдительности.

Статистика: от 7 до 36 % аварий происходит по вине персонала; 73 % из них — в результате неблагоприятных психологических качеств человека. Аналогичные результаты дает анализ причин несчастных случаев на предприятиях «Белглавэнерго», %: психологические — 49,1; социально-психологические — 21,8; смешанные — 22,7; технические — 4,3; прочие — 2,1.

Для операторов атомной электростанции психологическая нагрузка еще выше: более высокая личная ответственность; опасность радиационного облучения; риск радиационного заражения местности в случае аварии с выходом теплоносителя.

Психологи определяют две группы качеств профессиональной подготовки: знания и навыки, психологические, психофизиологические и социально-психологические качества, такие как: стрессоустойчивость, выдержка, добросовестность, ответственность, умение работать в группе. Как правило, основная часть оперативного персонала этому комплексу качеств удовлетворяет. Однако здесь, видимо, требуется полное, 100 %, соответствие оперативного персонала этим качествам, так как неизвестно, на чью долю придется критическая ситуация, из которой придется выходить.

Не следует забывать о социально-психологическом аспекте надежности человеческого фактора в условиях политических столкновений в обществе (тревоги внешнего мира становятся фактором риска, когда у пульта обеспокоенный оператор). В целом сложная картина воздействий на человека, управляющего потенциально опасной техникой, представлена на рис. 7.1.

При этом для разных людей движущие мотивы профессионального поведения могут быть различные: познавательный интерес к делу, уважение к профессии, осознание ответственности, избегание конфликтов, карьеризм, утилитарный подход (зарплата, премия, жилье, машина, путевка на отдых и т. д.).

Особого рассмотрения требует поведение человека в экстремальных (аварийных) ситуациях. За примером обратимся к работе проф. С. А. Тевлина [64], в которой весьма наглядно раскрыт этот вопрос при анализе аварий на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г.) и Чернобыльской АЭС

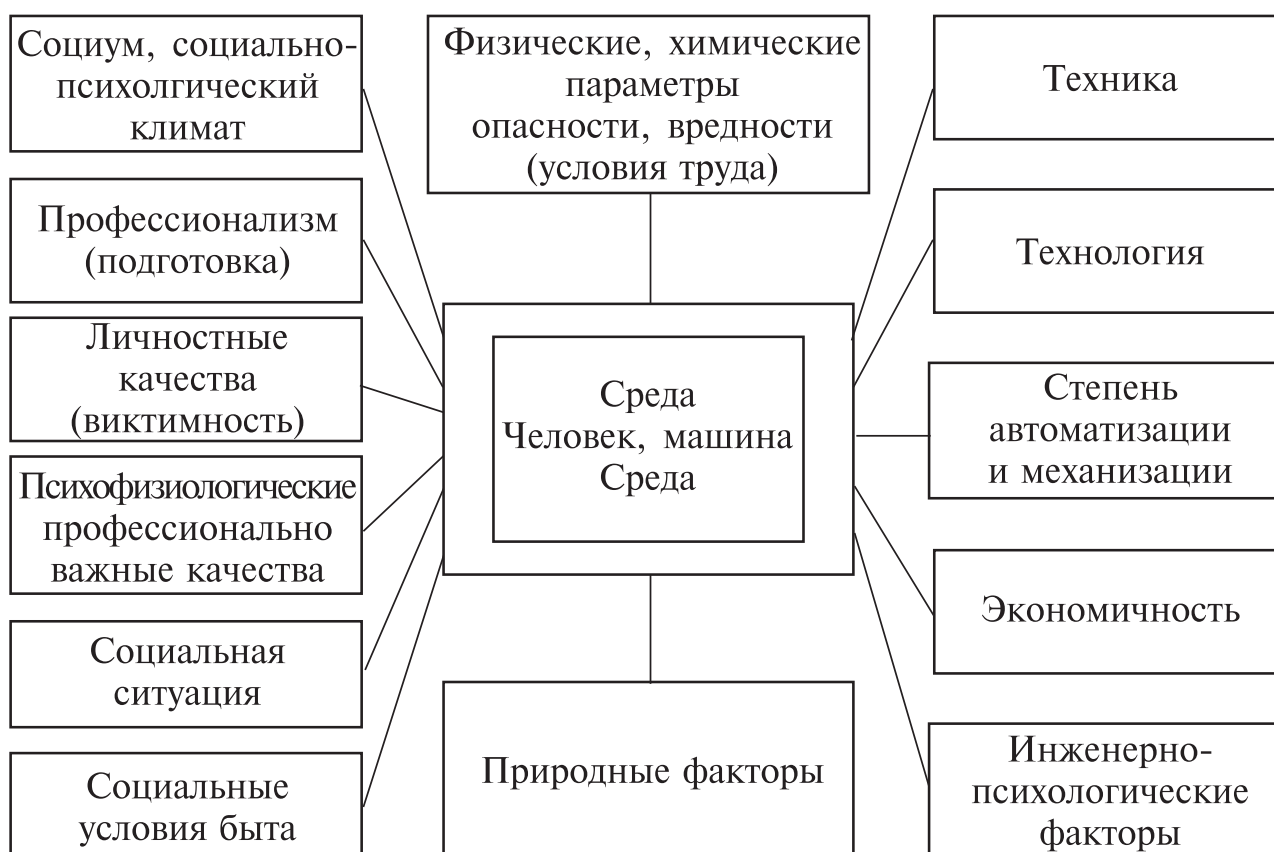


Рис.7.1. Факторы, воздействующие на человека, управляющего потенциально опасной техникой

(бывший СССР, 1986 г.). Одновременно вы обнаружите и ряд ошибок из приведенной нами классификации.

В экстремальных ситуациях человек, как правило, продолжает ту линию поведения, которая отработана в предыдущий период. Мера воплощения привычных стереотипов зависит от выраженности таких личных качеств, как: эмоциональная выдержка, добросовестность, доверчивость, самоконтроль, стрессоустойчивость и доброжелательность.

Поэтому формула безопасности: критическая позиция (I) + строго регламентированный и взвешенный подход (II) + коммуникабельность (III) = безопасность, — будучи внедренной в стереотип поведения оператора, обеспечивает:

- предотвращение (удаление от) аварийной ситуации;
- снижение процента ошибок при управлении аварией.

Это нетрудно проследить на примерах крупных радиационных аварий на АЭС в последние десятилетия. С 1944 по 1988 г. в мире произошло 296 таких аварий, в которых пострадало 136 615 чел., из них 24 853 чел. получили значительное облучение (6 Гр на кожу или 0,25 Гр на все тело) и 69 чел. погибли. Из них 13 случаев приходится на ядерные реакторы и критсборки, а остальные — на радиационные установки и радиофармацевтику.

При развитии аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» отмечаются следующие ошибки персонала:

- ремонтники оставили закрытыми задвижки на линии аварийного питания парогенератора (ПГ).
- непонимание протекающих процессов вследствие отсутствия полной информации, стереотипа мышления и недочетов конструкции. В частности, существенную роль в развитии аварии сыграл импульсный предохранительный клапан (ИПК) на линии от конденсатора давления (КД), который не закрылся после срабатывания. Аналогичная ситуация сложилась на 11 мая 1984 г. на Калининской АЭС, которая, к счастью, не привела к аварии. Возврат на место ИПК КД происходит далеко не всегда, наблюдались случаи не посадки клапана и на других АЭС уже после аварии на «Три-Майл-Айленд». Однако это не породило импульса к исправлению положения. Это пример отсутствия культуры безопасности на арматурном предприятии — изготовителе и в проектной организации, использовавшей такой ИПК в проекте.

В возникновении наиболее тяжелой аварии за всю историю атомной энергетики — аварии на ЧАЭС — большую негативную роль сыграл оперативный персонал. Известно, что человеческие ошибки совершаются только в условиях, когда люди не могут их не сделать. Исходя из этого представляется важным оценить психологическую и социально-психологическую обстановку на ЧАЭС.

1. ЧАЭС — одна из лучших АЭС. Благоустроенный город Припять. Престижное место работы.

2. Квалификация оперативного персонала на ЧАЭС, и в пятой смене в частности (когда произошла авария), в общем, не дает основания для сомнений: образование и практический опыт работы имелись.

3. ЧАЭС — Припять: обособление должностных группировок, внутри которых поддерживались отношения «своих».

4. Подбор и расстановка кадров осуществлялась в соответствии с п. 3.

5. Снижение активности жизненной позиции: определяющий мотив поведения — избежать конфликта с руководством (следствие: «Мне приказано — я делаю», т. е. буквальное следование инструкциям; равнодушие к производству; уход в мир личных интересов; «позиция винтика»).

6. Традиция сохранения в тайне информации об аварийных случаях, что исключает возможность обучения персонала и воспитания чувства коллективной ответственности.

7. Внутренняя установка на выполнение задания (плана производства электроэнергии, программы испытаний и т.п., но не на безопасность).

Перечисленное свидетельствует об отсутствии основных элементов культуры безопасности (дать анализ).

Следует отметить еще ряд негативных факторов:

1. Работа оператора может быть успешной, если технические характеристики управляемой системы соответствуют возможностям человека (профессиональная подготовка, психофизиологические и психологические характеристики). Это не было обеспечено в данном случае.

2. Управление блоком осуществлялось на основании богатого операторского опыта, знаний физических и теплофизических процессов и интуиции.

Успешный выход из нестандартных ситуаций в прошлом укрепляет уверенность в личных возможностях операторов и способствует потере бдительности у персонала, а иногда порождает и особую «доблесть» риска («Прорвемся, как и в прошлый раз!»).

3. Блочный щит управления был выполнен без учета требований эргономики (количество и важность информации).

Все эти негативные и позитивные обстоятельства реализовались во время аварии. Оценка масштабов аварии, доступная специалистам, не была доведена до сведения жителей города. «Соблюдать порядок, не сеять панику, ждать команд свыше» — вот тон руководящих указаний, продолжавших линию секретности. Пока дети работников АЭС баловались в лужах города, сами работники АЭС ликвидировали аварию.

Мотивы любого поступка определяются объективными условиями и индивидуальными особенностями человека. Оперативной задачей на ночь с 25 на 26 апреля было завершение испытаний по выбегу ротора турбины. Развитие событий послужило тому, что положительные личностные качества персонала — дисциплинированность, исполнительность — обратились в свою противоположность — безответственность и небрежность. Причина: привычка к существующему порядку вещей — «главное, чтобы не было конфликта с начальством», пассивная подчиненность, а не критическая позиция и личная ответственность за безопасность.

Возврат к проявлению личностных качеств в неискаженной служебной иерархией виде произошел после аварии. Оперативный персонал 5-й смены и прибывшие по тревоге работники АЭС проявляли выдержку, решительность, мужество, хотя по признакам острой лучевой болезни, появившимся в первые часы после аварии, представление об уровне радиации у них было. Поступки отражали высокую эмоциональную напряженность, активность гражданской позиции, имели целесообразный характер. В основе их лежали ощущение причастности к происшедшему событию, которое может иметь непредсказуемые последствия, ярко проявились чувства ответственности и долга в условиях непосредственной опасности для жизни.

Однако в ряде случаев отмечалась и неадекватная реакция на опасность: демонстрация бесстрашия, легкомысленный интерес к тому, как выглядит помещения 4-го блока, куски реакторного графита, разбросанные внутри и вне здания. В единичных случаях отмечалось и повышенное чувство опасности, нежелание покидать защищенное от радиации помещение даже для выполнения служебного задания.

После завершения первой, наиболее эмоционально напряженной фазы ликвидации аварии, отмечался в ряде случаев уход от инициативной, активной позиции, готовность подчиниться любому решению «сверху».

На развитие опасной ситуации оказывает процесс субъективного восприятия риска. Субъективное восприятие риска — очень интересный

и сложный вопрос. От того, как люди воспринимают события катастрофического характера, таким образом формируется их поведение при различных формах деятельности. У экспертов представление о риске от какой-либо технологии однозначно связано со смертностью от нее, у населения же такой связи нет.

Характерный пример: эксперимент, поставленный сотрудниками Всесоюзного научно-исследовательского института системных исследований (ВНИИСИ), был направлен на выявление особенностей субъективного представления людей о степени риска, связанного с различными видами деятельности. Он предполагал ранжирование испытуемыми тринадцати видов риска. Первое место по степени риска для общества (социального риска) в обобщенной ранжировке заняли стихийные бедствия, второе — АЭС, а последнее — поездки на железнодорожном транспорте и активный отдых (см. табл. 7.1).

Таблица 7.1

Ранжировка суждений о риске

Вид риска	Ранжировка риска
Стихийные бедствия	1
АЭС	2
Загрязнение окружающей среды	3
Потребление алкоголя	4
Добыча полезных ископаемых	5
Использование автотранспорта	6
Тепловые электростанции	8
Курение	8
Гидроэлектростанции	8
Полеты на самолетах	10
Рентген в медицине	11
Поездки на железнодорожном транспорте	12
Активный отдых	13

Полученная ранжировка неадекватна реальному положению вещей. Несомненно, что ущерб от стихийных бедствий велик и ежегодное число жертв стихийных бедствий оценивается 250—300 тыс. человек. Однако число жертв курения составляет до 2,5 млн чел. каждый год, что в восемь раз превышает число жертв, связанных с использованием автотранспорта.

Как показали исследования, на субъективное восприятие риска влияет множество факторов. Представляется необходимым привести только главные.

Оценка вероятностей наступления событий. Оценка вероятности наступления каких-либо событий является наиболее часто используемой операцией как в формальных методах принятия решений в условиях риска, так и в методах, основанных на профессиональных суждениях. Возможности человека правильно определять вероятности неопределенных событий существенно влияют на его способности оценивать степень риска в целом. Его оценки нарушают многие фундаментальные принципы рационального поведения.

Люди часто переоценивают надежность малых выборок, полагая, что их свойства характерны для всей совокупности. Малая выборка рассматривается как репрезентативная для суждения о характеристиках генеральной совокупности (эффект «репрезентативности»). Вероятности того или иного события часто определяются на основе того, как часто люди сталкивались с ними в прошлом (эффект «представительности»). Событие считается более вероятным, если человек может его представить, вспомнить аналогичные примеры. Это ведет к переоценке вероятностей ярких, запоминающихся событий и недооценке других.

Замечено, что люди плохо учитывают априорные вероятности и при оценке вероятности стремятся использовать преимущественно свой опыт («эгоцентризм»), игнорируя и считая ненадежной любую другую априорную информацию. При оценке надежности оборудования технических систем это может приводить к большой переоценке вероятности аварий, если последние имели место, и к недооценке — в случае безотказной работы оборудования.

Известно также, что человек недостаточно охотно меняет уже сложившиеся представления о вероятностях тех или иных событий под влиянием вновь поступившей информации. Если информация не согласуется с его представлениями, он склонен считать ее случайной и ненадежной («консерватизм»).

Значительное влияние на оценки людей оказывают точки отсчета. Когда в экспериментах людям давали разные значения вероятности события в качестве первого приближения и затем просили их скорректировать, ответы существенно отличались друг от друга и тяготели к точкам отсчета (эффект «якоря»).

Исследования показали, что человек, как правило, недооценивает вероятность очень вероятных событий и переоценивает вероятность маловероятных событий. Одновременно существует гипотеза, что человек не воспринимает вероятности порядка 10^{-6} , т. е. когда вероятность неблагоприятного исхода составляет один шанс из миллиона.

При оценке вероятностей двух последовательных независимых событий люди стремятся установить между ними связь (иллюзия «Монте-Карло»). При оценке вероятности совершения одновременно двух независимых событий люди часто игнорируют тот факт, что эта вероятность не может превосходить вероятности каждого из них в отдельности ($P(A)$ или $P(B)$ больше $P(A \text{ и } B)$).

Значимость последствий. Большую роль при этом играет то, какие потребности индивидуума могут быть удовлетворены в результате осуществления благоприятного исхода и какую угрозу ему может представлять неблагоприятный исход. Негативные последствия могут быть ранжированы с точки зрения их значимости для человека. Наиболее значимы последствия, ставящие под угрозу жизнь и здоровье человека, далее идут разнообразные последствия, связанные с семейным благополучием, карьерой и т. д.

Распределение угрозы во времени и пространстве. На восприятие риска оказывает большое влияние характер распределения негативных последствий во времени и пространстве. Так, чем ближе местожительство людей к рисковому предприятию, тем больше беспокойства они проявляют. Замечено также, что люди относятся терпимее к частым, распределенным во времени, мелким авариям, чем к более редким катастрофам с большим числом жертв, даже если суммарные потери в первом случае гораздо больше, чем во втором.

Связь между возможными последствиями и их вероятностями. Опыт деятельности страховых фирм показывает, что люди по-разному оценивают степень риска от ситуаций с возможно малой вероятностью наступления катастрофических событий (землетрясения, наводнения) и ситуаций с большей вероятностью менее значимых потерь (автопроисшествие). Они активно пытаются уберечь себя от последних, например покупкой страховок, и проявляют безразличие к первым. Психологи объясняют этот феномен тем, что люди в практической деятельности стараются абстрагироваться от маловероятных событий.

Контролируемость ситуации. Возможность контроля за развитием событий, использование своих навыков для избежания негативных последствий оказывает большое влияние на оценку приемлемости всей ситуации. Замечено, что люди предпочитают принимать участие в таких событиях, где много зависит от их личного мастерства.

Возможность свободного выбора. Имеются в виду два различных вида деятельности. Использование большинства современных промышленных технологий носит для людей «обязательный» характер, в отличие от таких видов деятельности, как употребление сигарет, занятие горнолыжным спортом и т. п. Замечено, что чем больше степень добровольности в использовании той или иной технологии, тем больше уровень риска, на который согласны идти люди.

Степень новизны технологии. Общество проявляет большую терпимость к старым, хорошо им известным науке и технологиям, чем к новым, относительно которых у них мало опыта.

Личностные характеристики лица, принимающего решения (свойства личности). Этот фактор оказывает влияние как на субъективную оценку вероятностей событий, так и на оценку серьезности возможных последствий. Он же играет существенную роль и при оценке ситуации в целом. Пол, возраст, образование, образ жизни, эмоциональный настрой, социальные

нормы и обычаи общества, степень доверия к органам власти, техническим экспертам, средствам массовой информации и другие факторы влияют на поведение человека при оценке уровня риска и безопасности.

ВЫВОД: люди в условиях аварии проявляют лишь те качества, которые в них были заложены, развиты и укреплены и которые неоднократно можно было наблюдать до аварии. И ничего более! С этой точки зрения культура безопасности, гуманизация технического образования, воспитание и привитие общечеловеческой культуры специалисту должны стоять в одном ряду с развитием техники и занимать тем более ответственную позицию, чем более опасной является та или иная отрасль техники.

7.2. Методология прогнозирования ошибок

Методы прогнозирования частоты ошибок человека основываются на классическом анализе и включают следующие этапы:

- составление перечня основных отказов системы;
- составление перечня и анализ действий человека;
- оценивание частоты ошибок человека;
- определение влияния частоты ошибок человека на интенсивность отказов рассматриваемой системы;
- выработка рекомендаций, внесение необходимых изменений в рассматриваемую систему и вычисление новых значений интенсивности отказов.

Одним из основных методов анализа надежности работы человека является построение дерева вероятностей (дерево исходов). При использовании этого метода задается некоторая условная вероятность успешного или ошибочного выполнения человеком каждой важной операции либо вероятность появления соответствующего события. Исход каждого события изображается ветвями дерева вероятностей. Полная вероятность успешного выполнения определенной операции находится суммированием соответствующих вероятностей в конечной точке пути успешных исходов на диаграмме дерева вероятностей. Этот метод с некоторыми уточнениями может учитывать такие факторы, как стресс, вызываемый нехваткой времени; эмоциональная нагрузка; нагрузка, определяемая необходимостью ответных действий, результатами взаимодействий и отказами оборудования.

Следует заметить, что данный метод обеспечивает хорошую наглядность, а связанные с ним математические вычисления просты, что в свою очередь снижает вероятность появления вычислительных ошибок. Кроме того, он позволяет специалисту по инженерной психологии легко оценить условную вероятность, которую в противном случае можно получить только с помощью решения сложных вероятностных уравнений.

ПРИМЕР. Оператор выполняет два задания — сначала x , а затем y . При этом он может выполнять их как правильно, так и неправильно. Другими словами, неправильно выполняемые задания — единственные ошибки, которые могут появляться в данной ситуации. Требуется построить дерево возможных исходов и найти общую вероятность неправильного выполнения задания. Предполагается, что вероятности статистически независимы.

Для решения поставленной задачи воспользуемся деревом возможных исходов, изображенным на рис. 7.2 и введем следующие обозначения:

- P_s — вероятность успешного выполнения задания;
- P_f — вероятность невыполнения задания;
- s — успешное выполнение задания;
- f — невыполнение задания;
- P_x — вероятность успешного выполнения задания x ;
- P_y — вероятность успешного выполнения задания y ;
- P_x^- — вероятность невыполнения задания x ;
- P_y^- — вероятность невыполнения задания y .

Согласно рис. 7.2, вероятность успешного выполнения задания равна $P_s = P_x \cdot P_y$. Аналогично находится выражение для вероятности невыполнения задания:

$$P_f = P_x \cdot P_y^- + P_x^- \cdot P_y + P_x^- \cdot P_y^- = 1 - P_x \cdot P_y.$$

Из рис. 7.2 следует, что единственным способом успешного выполнения системного задания является успешное выполнение обоих заданий — x и y . Именно поэтому вероятность правильного выполнения системного задания определяется как $P_x \cdot P_y$.

Для оценки надежности работы операторов технических систем необходимо учитывать следующие факторы:

- качество обучения и практической подготовки;
- наличие письменных инструкций, их качество и возможность неправильного их толкования;
- эргономические показатели рабочих мест;
- степень независимости действий оператора;
- наличие операторов-дублеров;
- психологические нагрузки.

Оценивание частоты ошибок человека следует проводить только после рассмотрения всех этих факторов, так как они влияют на качество работы оператора. Полученные оценки должны затем включаться в процедуру анализа дерева отказов.

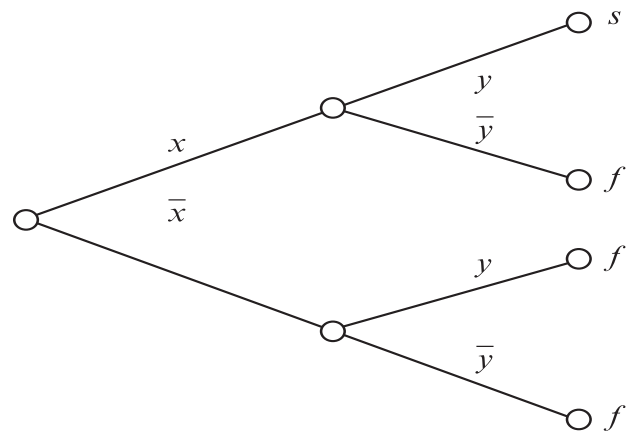


Рис. 7.2. Схема дерева исходов

7.3. Принципы формирования баз об ошибках человека

Базы данных об ошибках человека необходимы для анализа и прогнозирования безопасности рассматриваемой системы, предупреждения опасных ситуаций. Их можно разделить на следующие три категории.

Базы экспериментальных данных: содержат результаты лабораторных экспериментов и заслуживают большего доверия, чем базы данных иного типа, поскольку в меньшей степени подвержены влиянию субъективных оценок, способных приводить к ошибкам. Однако необходимо иметь в виду, что с какой бы тщательностью ни формировались подобные базы данных, в них всегда присутствует значительный элемент субъективности.

Базы эксплуатационных данных: являются более реальными, чем базы экспериментальных данных, однако сформировать такие базы довольно трудно, поскольку для этого требуется тщательная регистрация действий в реальных условиях эксплуатации. Подобные базы данных дают более удовлетворительные результаты, чем лабораторные исследования, поскольку в лабораторных условиях часто ставятся надуманные задачи.

Известны [69] крупные базы эксплуатационных данных о параметрах эксплуатации оборудования. Одной из них является «Система регистрации и оценок данных о качестве работы (OPREDS)», позволяющая автоматически следить за всеми действиями оператора. Однако она приемлема только в некоторых ситуациях (например, в системах коммутации). Другим примером является «Банк данных о частоте ошибок по вине человека (SHERB)», созданный фирмой Sandy. Ниже, в качестве примера, приведены оценки ошибок операторов из документа WASH-1400 [69].

1. Выбор не простого переключателя, а управляемого с помощью ключа (это значение не учитывает ошибки принятия решения в случае, когда оператор неправильно воспринимает ситуацию и полагает, что данный ключ выбран правильно) — частота ошибок 10^{-5} .

2. Выбор переключателя (или двух переключателей), непохожего по форме или по расположению на нужный переключатель при условии отсутствия ошибки в принятии решения; например, оператор включает переключатель с большой рукояткой вместо малого переключателя — частота ошибок 10^{-4} .

3. Обычная ошибка человека при выполнении операции (например, неправильное считывание таблички и в результате выбор ошибочного переключателя) — частота ошибок $3 \cdot 10^{-3}$.

4. Обычная ошибка (упущение) человека, если в зале управления отсутствует сигнализация о состоянии параметра, упущенного оператором (например, отказ, связанный с невозвращением испытательного клапана с ручным переключением в исходное положение после завершения технического обслуживания) — частота ошибок 10^{-2} .

5. Простые арифметические ошибки при проведении самопроверки, но без выполнения повторных вычислений — частота ошибок $3 \cdot 10^{-2}$.

6. Частота ошибок $1/X$ — при условии, что оператор дотягивается до неправильного переключателя (или пары переключателей) и выбирает похожий переключатель (или пару переключателей). Здесь X — число неправильных переключателей (или пар переключателей), расположенных рядом с нужным переключателем. Формула $1/X$ применима, если имеется до пяти или шести переключателей. При большем числе переключателей частота ошибок уменьшается, так как оператор тратит в этом случае больше времени, отыскивая нужный вариант. При числе переключателей до пяти или шести оператор не думает об ошибке, и поэтому более вероятно, что он не ведет тщательный поиск.

7. Персонал другой рабочей смены не проверяет оборудование, если только не дается письменной директивы или специального перечня для проверки — частота ошибок 10^{-1} .

8. Обычная частота ошибок при условии напряженной работы оператора, при которых очень быстро происходят опасные действия, — частота ошибок $0,2-0,3$.

Базы субъективных данных: составляются на основе экспертных оценок. Создание таких баз обходится сравнительно дешево и не вызывает особых трудностей, поскольку большой объем информации может быть получен от небольшого числа опрошенных экспертов.

Чтобы базы субъективных данных можно было использовать при анализе надежности работы человека, необходимо:

- обеспечить требуемую точность данных; для баз субъективных данных характерны определенные погрешности, поэтому нужно иметь в виду, что их точность всегда меньше, чем точность баз экспериментальных данных;
- гарантировать представительность экспертных оценок.

Субъективные данные должны поступать только от тех лиц, которые считаются высококвалифицированными специалистами, способными справиться с этой работой и которые, кроме этого, могли бы наблюдать за выполнением подобных заданий другими экспертами. Например, лучше получать данные от операторов, чем от специалистов по инженерной психологии; учитывать конкретный характер работы. Необходимо очень тщательно выбирать используемый метод оценки с учетом характера оцениваемой работы; правильно установить уровень экспертного оценивания. Факторы, определяющие качество оцениваемой работы, должны выявляться на начальном этапе оценочной деятельности. Кроме того, необходимо четко определить типы ошибок, характерных для рассматриваемого процесса выполнения задания; четко определить процедуру оценивания. Для получения субъективных оценок необходимо четко описать применяемую процедуру; например, это может быть метод парного сравнения.

Основное преимущество базы субъективных данных состоит в широком охвате всех параметров, по которым требуется иметь данные об ошибках.

Г Л А В А 8

Организация и проведение экспертизы технических систем

8.1. Причины, задачи и содержание экспертизы

Причиной проведения исследований может быть, например:

- необходимость проверки системы;
- принятие решения относительно целесообразности и места размещения;
- принятие решения о приобретении какого-либо вида оборудования;
- разработка перечня вопросов для поставщиков;
- проверка инструкций по эксплуатации;
- улучшение безопасности существующих систем;
- выявление опасностей для работающих на предприятии;
- выявление опасностей для предприятия и оборудования;
- выявление опасностей для населения;
- выявление опасностей для окружающей среды.

Содержание этапов и работ при проведении экспертизы приведено в таблице 8.1.

Следует определить физические пределы (границы) обследуемой системы с учетом возможности ее взаимодействия с соседними системами или зданиями, а также предусмотреть любые ограничения временного и финансового характера.

Общие задачи и цели исследования обычно устанавливаются лицом, ответственным за реализацию проекта или за работу предприятия; им может быть, например, руководитель проекта, инженер-проектировщик или руководитель предприятия. Необходимо определить обязанности каждого члена группы. Задачи и цели исследования гораздо легче и проще установить, если руководитель имеет глубокое представление о методах исследования.

Таблица 8.1

Содержание этапов и работ экспертизы

Этапы	Работы
1. Подготовительный	1.1. Формирование цели экспертной оценки 1.2. Формирование рабочей группы
2. Работа рабочей группы	2.1. Уточнение цели 2.2. Выбор методов, способов и процедур оценки 2.3. Определение перечня операций, выполняемых экспертами 2.4. Формирование экспертной группы 2.5. Выбор методов и процедур опроса экспертов 2.6. Подготовка анкет для опроса экспертов 2.7. Проведение опроса экспертов
3. Работа экспертной группы	3.1. Определение состава показателей 3.2. Определение коэффициентов весомости показателей 3.3. Определение базовых значений показателей 3.4. Определение оценок единичных показателей
4. Заключительный	4.1. Обработка экспертных оценок 4.2. Анализ результатов и подготовка решения экспертной группы

8.2. Организация экспертизы

Экспертиза должна являться основной частью исследования эксплуатационной пригодности и безопасности технической системы.

По существу, экспертиза предусматривает полное описание технологического процесса, системную проверку состояния каждой части его для того, чтобы выявить, как может произойти отклонение от проектного режима работы системы, и решить, может ли это отклонение создать опасность. Проверке подвергается по очереди каждая часть системы. При этом по каждой части ставится ряд вопросов, определенных в соответствии с методом исследования. Целью проверки является выявление всех возможных отклонений от предусмотренного проектом режима работы, а также всех потенциальных опасностей, связанных с этим отклонением. Кроме того, некоторые опасности могут быть тут же устранены. Если такое решение не окажет благоприятного влияния на другие части системы, может быть вынесено решение о немедленной модификации установки.

Таким образом, результаты проверок обычно включают ряд решений и вопросов для дальнейшего обсуждения на совещаниях экспертов.

Несмотря на то что в результате применения описанного метода может возникнуть ряд гипотетических отклонений, успех или неудача проверки зависят от:

- обозначенной области исследования;
- количества и качества располагаемой информации (точности чертежей и других данных, использованных при проведении экспертизы);
- технической подготовки, практического опыта и интуиции экспертов группы;
- способности экспертов наряду с научным методом использовать творческое воображение, чтобы четко представить себе причины и последствия отклонения от режима работы;
- способности экспертов сохранять чувство меры, особенно при оценке степени выявленной опасности.

Так как экспертиза строго систематизирована и имеет четкую структуру, необходимо, чтобы лица, участвующие в ней, пользовались определенными терминами и правилами в установленном порядке.

Большое значение в анализе имеет определение полноты и достоверности информации. Для этого необходимо описывать проблемную ситуацию по определенной системе, сущностью которой является структура информации и логическая последовательность ее выполнения. Древнеримский теоретик ораторского искусства Марк Фабий Квинтилиан утверждал, что любую, сколь угодно сложную ситуацию можно полностью описать следующими семью вопросами: **что, где, когда, кто, почему, с какой целью, при каких условиях**. Эти вопросы определяют структуру сбора (изложения) информации и позволяют детализировать описание проблемной ситуации. Основные рекомендации, вытекающие из приведенного, выглядят следующим образом:

1. Описание проблемной ситуации должно быть полным, точным, кратким, носить аналитический характер.
2. Дать описание условий: место, время и сущность проблемы (ответы на вопросы: где? когда? что?).
3. Описать комплекс условий и провести анализ причин возникновения и развития проблемной ситуации (при каких условиях? почему?).
4. Определить принадлежность проблемы (кто?).
5. Оценить актуальность, срочность и новизну проблемы (с какой целью? когда нужно решать? было ли раньше?).
6. Определить взаимосвязь с другими проблемами (на что влияет?).
7. Оценить степень полноты и достоверности информации о проблемной ситуации (насколько полны и точны данные?).
8. Оценить возможность решения проблемы с учетом существующих условий (можно ли решить?).
9. Описание и анализ проблемной ситуации заканчивается краткой и емкой формулировкой путей решения.

8.3. Подбор экспертов

В группу входят специалисты, решающие технические вопросы и выполняющие вспомогательную работу. Для решения большинства задач важно иметь в группе необходимое количество специалистов высокой квалификации с достаточным практическим опытом работы, что позволит им самостоятельно ответить на большинство поставленных перед ними вопросов, не прибегая к дополнительной экспертизе.

Подбор количественного и качественного состава экспертов производится на основе масштабов изучаемой проблемы, достоверности оценок, характеристик экспертов и затрат ресурсов.

Широта исследуемой проблемы определяет необходимость привлечения к экспертизе специалистов различного профиля. Следовательно, минимальное число экспертов определяется количеством различных аспектов, направлений, которые необходимо учесть.

Например, проверка небольшого химического предприятия будет квалифицированно выполнена группой, включающей следующих специалистов:

- руководитель производства;
- руководитель проекта, ответственный за проект в целом;
- инженер-механик;
- инженер-химик;
- химик-аналитик (специалист, выполняющий научно-исследовательскую работу).

Состав группы может варьироваться в зависимости от типа проекта. Например, в некоторых случаях требуется включение в группу инженеров по контрольно-измерительным приборам и автоматике, инженеров-электриков, инженеров-строителей, инженеров-экологов и т. д.

Группа должна быть достаточно компетентной, чтобы разрабатывать соответствующие технические рекомендации.

Если некоторые члены группы назначаются из числа лиц, ответственных за проектирование системы, необходимо, чтобы члены этой группы имели соответствующие полномочия для внесения определенных изменений.

Группа не должна быть слишком большой, иначе могут возникнуть определенные трудности в принятии решения; численность должна определяться поставленной задачей.

Очень важно, чтобы отношение всей группы в целом к исследованию носило положительный и конструктивный характер, поскольку успех исследования в основном зависит от творческого мышления членов группы. Это положительное отношение должно формироваться на самых ранних этапах исследования. Соответствующее обучение может оказать большую помощь в создании благоприятного психологического микроклимата при работе, требующей тщательного анализа, объективности и ответственности.

Характеристики группы экспертов определяются на основе индивидуальных характеристик экспертов: **компетентности, креативности, отношения к экспертизе, конформизма, конструктивности мышления, коллективизма, самокритичности, протокольности мышления.**

В настоящее время перечисленные характеристики в основном оцениваются качественно. Для ряда характеристик имеются приближенные количественные оценки.

Компетентность — степень квалификации экспертов в определенной области знаний. Компетентность может быть определена на основе анализа деятельности специалиста, уровня и широты знакомства с достижениями науки и техники, понимания исследуемых проблем, возможных путей их развития.

Для количественной оценки уровня компетентности используется **коэффициент компетентности**, с учетом которого взвешивается мнение эксперта. Этот коэффициент определяется по априорным и апостериорным данным. При использовании априорных данных оценка коэффициента компетентности производится до проведения экспертизы на основе самооценки эксперта и взаимной оценки других экспертов. При использовании апостериорных данных оценка коэффициента компетентности производится на основе обработки результатов экспертизы.

Из множества методик определения коэффициента компетентности по априорным данным наиболее простой является методика оценки относительных коэффициентов компетентности по результатам высказывания специалистов о составе экспертной группы. Сущность этой методики заключается в следующем. Ряду специалистов предлагается высказать суждение о включении лиц в экспертную группу для решения определенной проблемы. Если в этот список попадают лица, не вошедшие в первоначальный список, то им также предлагается назвать специалистов для участия в экспертизе. Проведя несколько туров такого опроса, можно составить достаточно полный список кандидатов в эксперты. По результатам проведенного опроса составляется матрица, в ячейках которой проставляется переменная x_{ij} , равная:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й эксперт назвал } i\text{-го эксперта;} \\ 0, & \text{если } j\text{-й эксперт не назвал } i\text{-го эксперта.} \end{cases}$$

Причем каждый эксперт может включать или не включать себя в экспертную группу. По данным матрицы вычисляются коэффициенты компетентности, как относительные веса экспертов по формуле:

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (i = \overline{1, m}),$$

где: k_i — коэффициент компетентности i -го эксперта,
 m — количество экспертов (размерность матрицы $\|x_{ij}\|$).

Коэффициенты компетентности нормированы так, что их сумма равна единице:

$$\sum_{i=1}^m k_i = 1.$$

Содержательный смысл коэффициентов компетентности, вычисленных по данным таблицы матрицы $\|x_{ij}\|$, состоит в том, что подсчитывается сумма единиц (число «голосов»), поданных за i -го эксперта, и делится на общую сумму всех единиц. Таким образом, коэффициент компетентности определяется как относительное число экспертов, высказавшихся за включение i -го эксперта в список экспертной группы.

Креативность — это способность решать творческие задачи. В настоящее время, кроме качественных суждений, основанных на изучении деятельности экспертов, нет каких-либо предложений по оценке этой характеристики.

Конформизм — это подверженность влиянию авторитетов. Особенно сильно конформизм может проявиться при проведении экспертизы в виде открытых дискуссий. Мнение авторитетов подавляет мнение лиц, обладающих высокой степенью конформизма.

Отношение к экспертизе является очень важной характеристикой качества эксперта при решении проблемы. Негативное или пассивное отношение специалиста к решению проблемы, большая занятость и другие факторы существенно сказываются на выполнении экспертами своих функций. Поэтому участие в экспертизе должно рассматриваться как плановая работа.

Конструктивность мышления — это прагматический аспект мышления. Эксперт должен давать решение, обладающее свойством практичности. Учет реальных возможностей решения проблемы очень важен при проведении экспертного оценивания.

Коллективизм должен учитываться при проведении открытых дискуссий. Этика поведения человека в коллективе во многих случаях существенно влияет на создание положительного психологического климата и тем самым определяет успешность решения проблемы.

Самокритичность эксперта проявляется при самооценке степени своей компетентности, а также при принятии решения по рассматриваемой проблеме.

Протокольность мышления — способность к качественной и количественной точности в отображении явлений, не зависящая от психического состояния и настроения исследователя.

Перечисленные характеристики эксперта достаточно описывают необходимые качества, которые влияют на результаты экспертизы. Однако их анализ требует кропотливой и трудоемкой работы по сбору информации

и ее изучению. Кроме того, как правило, часть характеристик эксперта оценивается положительно, а часть — отрицательно. Возникает проблема согласования характеристик и выбора экспертов с учетом противоречивости их качеств. Причем чем больше характеристик принимается во внимание, тем труднее принять решение о том, что важнее и что допустимо для эксперта. Для устранения указанной трудности необходимо сформулировать обобщенную характеристику эксперта, учитывающую его важнейшие качества, с одной стороны, и допускающую непосредственное ее измерение, с другой стороны. В качестве такой характеристики можно принять достоверность суждений эксперта, которая определяет его как «измерительный прибор». Однако применение такой обобщенной характеристики требует информации о прошлом опыте участия эксперта в решении проблем. В ряде случаев такой информации может не быть. Достоверность оценок эксперта количественно оценивают по формуле:

$$D_i = \frac{N_i}{N}, \quad (i = \overline{1, m}),$$

где: N_i — число случаев, когда i -й эксперт дал решение, приемлемость которого подтвердилась практикой,

N — общее число случаев участия i -го эксперта в решении проблемы.

Вклад каждого эксперта в достоверность оценок всей группы определяется по формуле:

$$Q_i = \frac{D_i}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_i} \quad (i = \overline{1, m}),$$

где: m — число экспертов в группе. В знаменателе стоит средняя достоверность группы экспертов.

8.4. Экспертные оценки

В случае ограниченных возможностей применения точных математических методов из-за отсутствия достаточно точной статистической и другой информации о надежных показателях и технических характеристиках системы, а также надежных математических моделей, описывающих реальное состояние системы, экспертные оценки являются единственным средством решения задач безопасности.

Можно выделить два уровня использования экспертных оценок: качественный и количественный. Применение оценок на качественном уровне (определение возможного развития опасной ситуации из-за отказа системы, выбор окончательного варианта решения и др.) не вызывает сомнения. Возможность применения количественных, балльных экспертных оценок нередко оспаривается, а результаты подвергаются сомнению. При этом спра-

ведливо отмечается, что количественные или балльные оценки нередко скрывают неумение квалифицированно, на научной основе оценивать те или иные состояния, явления, пути развития ситуации. Очень часто выбор групповых решений на основе оценок отдельных экспертов проводится без анализа правомерности получения такого решения. Кроме того, в большинстве методик экспертных опросов не уделяется достаточного внимания обоснованию выбранной схемы интегрирования оценок, полученных на основе использования нескольких критериев, по которым ведется оценка состояния исследуемого объекта.

Исходя из вышеизложенного, применение экспертных оценок требует анализа их объективности и надежности. С одной стороны, нет гарантий, что полученные оценки достоверны, а с другой — существуют значительные трудности при проведении опроса экспертов и обработке полученных данных. Применяемые способы определения достоверности экспертных оценок основаны на предположении, что при согласовании действий экспертов эта достоверность обеспечена. Однако в ряде случаев эксперты, не согласные с мнением большинства, давали правильные оценки. Это объясняется психологией принятия решений в группе и распределением ответственности.

Следовательно, единодушие большинства экспертов не всегда является критерием достоверности оценок. Отсюда вытекает необходимость тщательного отбора экспертов. Дело в том, что при обсуждении многих вопросов, например, определения развития опасной ситуации на предприятии вследствие отказа определенной системы, должны участвовать эксперты высокой квалификации, одного уровня подготовки, знающие цепь всего производства и могущие оценить весьма отдаленные последствия. Прогнозы, составленные «средними» экспертами, будут основаны на знаниях только отдельного вопроса.

Используя экспертные оценки, предполагают, что при решении проблем в условиях неопределенности мнение группы экспертов надежнее, чем мнение отдельного эксперта, т.е. две группы одинаково компетентных экспертов с большей вероятностью дадут аналогичные ответы, чем два эксперта. Предполагается также, что совокупность индивидуальных ответов экспертов должна включать «истинный» ответ.

Зачастую оценки экспертов не обладают достаточной устойчивостью, т.е. эксперт может одни и те же события при нескольких повторных экспертизах оценить по-разному. Чем устойчивее оценки, тем больше можно им доверять. Однако на практике повторная экспертиза вследствие организационных, временных ограничений, финансовых трудностей применяется крайне редко.

При нахождении оценок экспертным путем, помимо погрешности, вызванной недостатком информации о событиях и недостаточной компетентностью экспертов, возможна и погрешность, обусловленная возможной заинтересованностью экспертов в результатах оценки. Такая погрешность

может значительно искажать оценки, и необходимо заранее предусмотреть меры для ее устранения.

Одним из показателей, характеризующих пригодность эксперта, является степень его надежности, т. е. относительная частота случаев, когда он приписывал более высокую вероятность событиям, которые впоследствии происходили.

8.5. Опрос экспертов

В практике экспертизы и прогнозирования применяются как индивидуальные, так и групповые (коллективные) экспертные опросы. Основными целями использования индивидуальных экспертных оценок являются:

- прогнозирование развития событий и явлений, а также оценка их значимости в текущем периоде;
- анализ и обобщение результатов, представленных другими экспертами;
- составление сценариев развития ситуации;
- заключение о работе других специалистов или организаций (рецензии, отзывы, экспертизы и т. д.).

Опрос экспертов представляет собой заслушивание и фиксацию в содержательной и количественной форме суждений экспертов по решаемой проблеме. Проведение опросов является основным этапом современной работы групп экспертов. На этом этапе выполняются следующие процедуры:

- решение организационно-методических вопросов;
- постановка задачи и предъявление вопросов экспертам;
- информационное обеспечение работы экспертов.

Вид опроса по существу определяет разновидность метода экспертной оценки. Основными видами опроса являются: **анкетирование, интервьюирование, метод «Дельфи», мозговой шторм (мозговая атака), дискуссия.**

Выбор того или иного вида опроса определяется целями экспертизы, сущностью решаемой проблемы, полнотой и достоверностью исходной информации, располагаемым временем и затратами на проведение опросов. Рассмотрим содержание технологии проведения перечисленных выше опросов.

Анкетирование представляет собой опрос экспертов в письменной форме с помощью анкет. В анкете содержатся вопросы, которые позволяют выяснить существо и аргументацию ответов.

По типу основные вопросы классифицируются на открытые, закрытые и с веером ответов. Открытые вопросы предполагают ответ в произвольной форме. Закрытые вопросы — это такие вопросы, на которые ответ может быть дан в виде «да», «нет», «не знаю». Вопросы с веером ответов предполагают выбор экспертами одного из совокупности предполагаемых ответов.

Открытые вопросы целесообразно применять в случае большой неопределенности проблемы. Этот тип вопросов позволяет широко охватить рас-

смаатриваемую проблему, выявить спектр мнений экспертов. Недостатком такого типа вопросов является возможное разнообразие и произвольная форма ответов, что существенно затрудняет обработку анкет.

Закрытые вопросы применяются в случае рассмотрения четко определенных двух альтернативных вариантов, когда требуется по существу определить степень большинства мнений по этим альтернативам. Обработка закрытых вопросов не вызывает каких-либо трудностей.

Вопросы с веером ответов целесообразно использовать при наличии нескольких достаточно определенных альтернативных вариантов. Эти варианты формируются для ориентации экспертов по возможному кругу направлений в решении проблемы. Для получения более детальной информации по каждому вопросу могут быть предложены порядковая и балльная шкалы. Эксперт по каждому ответу выбирает значение порядковой и балльной оценок. Например, значениями порядковой шкалы могут быть: «очень хорошо», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно» или «значительно», «незначительно», «не влияет» и т. п. Обработка анкет с вопросами этого типа по сложности занимает промежуточное место между открытыми и закрытыми вопросами.

Если анкетирование проводится в несколько туров, то целесообразно при большой сложности и неопределенности проблемы вначале использовать открытые типы вопросов, а на последующих турах — с веером ответов и закрытые типы.

Интервьюирование — это устный опрос, проводимый в форме беседы-интервью. Для подготовки беседы опрашивающий разрабатывает вопросы к эксперту. Характерной особенностью этих вопросов является возможность быстрого ответа на них экспертом, поскольку он практически не имеет времени на обдумывание.

Тематика интервью сообщается эксперту заранее, но конкретные вопросы ставятся непосредственно в процессе беседы. Целесообразно в связи с этим готовить последовательность вопросов, начиная от простого и постепенно их углубляя и усложняя, но вместе с тем конкретизируя.

Достоинством этого метода является непрерывный живой контакт с экспертом, что позволяет быстро получить необходимую информацию путем прямых и уточняющих вопросов в зависимости от ответов эксперта.

Недостатками интервью являются возможность сильного влияния опрашивающего лица на ответы экспертов, отсутствие времени для глубокого обдумывания ответов и большие затраты его на опрос всего состава экспертов.

Интервьюер должен хорошо знать анализируемую проблему, уметь четко формулировать вопросы, создать непринужденную обстановку и уметь слушать.

Метод «Дельфи» (название взято из истории Дельфийского оракула при храме Аполлона в Дельфах, Древняя Греция). Этот метод (иногда именуется метод «Дельфы») является одним из наилучших методов использования

суждения экспертов, предусматривающий проведение опросов в несколько туров. Он представляет собой многотуровую процедуру анкетирования с обработкой и сообщением результатов каждого тура экспертам, работающим инкогнито по отношению друг к другу. Процесс выработки суждений экспертами здесь управляется проводящей опрос рабочей группой через обратную связь.

В первом туре экспертам предлагаются вопросы, на которые они дают ответы без аргументирования. Известные примеры применения метода «Дельфи» связаны с постановкой вопросов, требующих в качестве ответов цифровой оценки параметров. Полученные от экспертов данные обрабатываются с целью выделения среднего или медианы и крайних оценок значений. Экспертам сообщаются результаты обработки первого тура опроса с указанием расположения оценок каждого эксперта. Если оценка эксперта сильно отклоняется от среднего значения, то его просят аргументировать свое мнение или изменить оценку.

Во втором туре эксперты аргументируют или изменяют свою оценку с объяснением причин корректировки. Результаты опроса во втором туре обрабатываются и сообщаются экспертам. Если после первого тура производилась корректировка оценок, то результаты обработки второго тура содержат новые средние и крайние значения оценок экспертов. В случае сильного отклонения своих оценок эксперты должны аргументировать или изменить свои суждения, пояснив причины корректировки.

Проведение последующих туров осуществляется по аналогичной процедуре. Обычно после третьего или четвертого тура оценки экспертов стабилизируются, что служит критерием прекращения дальнейшего опроса.

Итеративная процедура опроса с сообщением результатов обработки после каждого тура обеспечивает лучшее согласование мнений экспертов, поскольку эксперты, давшие сильно отклоняющиеся оценки, вынуждены критически осмыслить свои суждения и обстоятельно их аргументировать. Необходимость аргументации или корректировки своих оценок не означает, что целью экспертизы являются получение полной согласованности мнений экспертов. Конечным результатом может оказаться выявление двух или более групп мнений, отражающих принадлежность экспертов к различным научным школам, ведомствам или категориям лиц. Получение такого результата является также полезным, поскольку позволяет выявить наличие различных точек зрения и поставить задачу на проведение исследований в данной области.

При проведении опроса сохраняется анонимность ответов экспертов по отношению друг к другу. Это обеспечивает исключение влияния конформизма, т. е. подавления мнений за счет «веса» научного авторитета или должностного положения одних экспертов по отношению к другим.

Исследования эффективности этого метода показали, что по мере проведения туров опроса разброс мнений экспертов уменьшается и групповое мнение в виде медианы индивидуальных оценок становится точнее. Основ-

ным фактором повышения точности ответов является итеративная процедура опроса с сообщением результатов обработки экспертам и указанием конкретного места оценки каждого эксперта.

Для повышения эффективности проведения экспертизы по методу «Дельфи» необходимо автоматизировать процесс фиксации, обработки и сообщения экспертам информации.

Мозговой штурм (мозговая атака) представляет собой групповое обсуждение с целью получения новых идей, вариантов решений проблемы. Характерной особенностью этого вида экспертизы является активный творческий поиск принципиально новых решений в трудных тупиковых ситуациях, когда известные пути и способы решения оказываются непригодными. Для поддержания активности и творческой фантазии экспертов категорически запрещается критика их высказываний. Свободные высказывания способствуют коллективной генерации идей. С помощью этого метода можно решать многие важные задачи безопасности, например:

- задачи определения вариантов выбора систем защиты, один из которых является оптимальным;
- задачи, решение которых требует параллельного или последовательного использования ряда разнообразных методов защиты;
- задачи, решение которых требует выявления факторов, учитываемых при определении окончательного решения.

Подобием коллективной генерации идей в практической работе можно считать всякого рода оперативные совещания.

Основные правила организации и методика проведения мозгового штурма заключаются в следующем. Осуществляется подбор экспертов в группу до 20—25 человек, в которую включаются специалисты по решаемой проблеме и специалисты с широкой эрудицией и богатой фантазией, причем не обязательно хорошо знающие рассматриваемую проблему. **Желательно включение в группу лиц, занимающих одинаковое служебное и общественное положение, имеющих одинаковый научный вес, что обеспечивает независимость высказываний.**

Для проведения заседания назначается ведущий, основной задачей которого является управление ходом обсуждения для решения поставленной проблемы. Ведущий в начале заседания объясняет содержание и актуальность проблемы, правила ее обсуждения и предлагает для рассмотрения одну-две идеи.

Обсуждение длится час без перерыва. Для выступления предоставляется 2—3 минуты и они могут повторяться. В каждом выступлении эксперты должны стремиться выдвинуть как можно больше новых, может быть, на первый взгляд, фантастических идей или развивать ранее выдвинутые идеи, дополняя и углубляя их. Важным требованием к выступлениям является конструктивный характер идей и предложений. Они должны быть направлены на решение проблемы. Ведущий и все члены экспертной группы должны своими действиями и высказываниями способствовать созданию

всеобщей синхронно работающей коллективной мысли, возбуждению мыслительных процессов, что существенно влияет на результативность обсуждений.

В процессе генерирования идей и их обсуждения прямая критика запрещена, однако она имеет место в неявной форме и выражается в степени поддержки и развития высказываний.

Выступления экспертов фиксируются путем стенографирования или магнитофонной записи и после окончания заседания подвергаются анализу, который заключается в группировке и классификации высказанных идей и решений по различным признакам, оценке степени полезности и возможности реализации. Примерно через сутки-двое экспертов просят сообщить, не возникли ли еще какие-нибудь новые идеи и решения. Практика показывает, что если в процессе заседания была создана хорошая творческая обстановка с активным участием всех экспертов, то после окончания обсуждения в мозге человека продолжается процесс генерации и анализа своих и других предложений, который протекает не только осознанно, но и подсознательно. В результате сопоставления высказываний, проведения аналогий и обобщения часто, примерно через сутки, эксперты формулируют наиболее ценные предложения и идеи. Поэтому сбор информации по возможным новым идеям способствует повышению эффективности метода мозгового штурма.

Существует ряд разновидностей мозгового штурма, в которых предлагается чередовать пятиминутные штурмы с обдумыванием его результатов, чередовать периоды генерации с дискуссиями и групповым принятием решений, применять последовательные этапы выдвижения предложений и их обсуждения, включать в группу экспертов «усилителей» и «подавителей» идей и т.п. Мозговой штурм применяется для решения разнообразных прикладных проблем.

Дискуссия. Этот вид экспертизы широко применяется на практике для обсуждения проблем, путей их решения, анализа различных факторов и т. п. Группа экспертов для проведения дискуссии должна быть не более 20 человек. Группа управления проводит предварительный анализ проблем дискуссии с целью четкой формулировки задач, определения требований к экспертам, их подбора и методики проведения дискуссии.

Сама ***дискуссия проводится как открытое коллективное обсуждение*** рассматриваемой проблемы, основной задачей которого является всесторонний анализ всех факторов, положительных и отрицательных последствий, выявление позиций и интересов участников.

В ходе дискуссии разрешается критика.

Дискуссия может проводиться несколько часов, и поэтому необходимо определить регламент работы: время на доклад ведущего и выступления, проведение перерывов. Следует иметь в виду, что во время перерывов дискуссия продолжается, т. е. имеют место кулуарные обсуждения. В связи

с этим не следует делать перерывы слишком короткими, поскольку локальные обсуждения дают положительный эффект.

Результаты дискуссии фиксируются в виде стенограмм или магнитной записи. После окончания дискуссии проводится анализ этих записей для более четкого представления основных результатов, выявления различий в мнениях. Так же как и при мозговом штурме примерно через сутки после окончания дискуссии может собираться дополнительная информация от экспертов.

Рассмотренные виды опроса дополняют друг друга и в определенной мере являются взаимозаменяемыми. Для генерации новых идей, направленных на решение проблем, целесообразно применять мозговой штурм, дискуссии, анкетирование и метод «Дельфи» (первые два тура).

Всесторонний критический анализ может быть проведен в форме дискуссии. Для количественной и качественной оценки свойств, параметров, времени и других характеристик исследуемых объектов применяются анкетирование и метод «Дельфи». Интервьюирование целесообразно использовать для уточнения результатов, полученных другими видами экспертизы.

Некоторые замечания о групповом экспертном опросе. Отдельный эксперт в ряде случаев может быть очень полезным как источник сведений и советник для руководителя, принимающего решения. Работа, выполненная одним экспертом, может обобщить мнения многих специалистов и дать полезные исходные данные для анализа. К числу групповых экспертных опросов относятся:

- открытое обсуждение вопросов с последующим открытым или закрытым голосованием;
- закрытое обсуждение (обсуждение без прямого контакта его участников при сохранении анонимности их мнений) с последующим закрытым голосованием или заполнением анкет экспертного опроса;
- свободное высказывание без обсуждения и голосования. Опыт показал, что открытое обсуждение поставленных перед группой экспертов вопросов до достижения определенного согласия между ними или до выработки общей позиции имеет ряд существенных недостатков. К ним относятся, в частности, взаимное влияние суждений экспертов и нежелание их отказываться от мнений, ранее высказанных публично. Поэтому при подготовке решений все более широко применяется закрытое обсуждение и свободное высказывание.

Закрытому обсуждению также свойствен ряд недостатков:

- отсутствие дискуссии;
- усложнение обратной связи из-за неточности формулировок, недоразумений или ошибок;
- относительно большой срок между запросом и ответом;
- трудности или ошибки в понимании причин высказанного мнения и неясности по поводу его источников.

Эти недостатки могут быть существенно уменьшены при сочетании письменной и устной форм опросов.

Закрытое обсуждение можно подразделить на две категории:

- опрос, проводимый в один тур, путем одноразового заполнения анкет;
- опрос, проводимый в несколько туров, путем многократного заполнения анкет экспертного опроса для последовательного уточнения оценок.

8.6. Оценка согласованности суждений экспертов

При оценке объектов исследования эксперты зачастую расходятся во мнениях по решаемой проблеме. В связи с этим возникает необходимость количественной оценки степени согласия экспертов. Получение количественной меры согласованности позволяет более обоснованно интерпретировать причины расхождения мнений.

Оценка согласованности суждения экспертов основывается на использовании понятия компактности, наглядное представление о котором дает геометрическая интерпретация результатов экспертизы. Оценка каждого эксперта представляется как точка в некотором пространстве, в котором имеется понятие расстояния. Если точки, характеризующие оценки всех экспертов, расположены на небольшом расстоянии друг от друга, т. е. образуют компактную группу, то, очевидно, можно это интерпретировать как хорошую согласованность мнений экспертов. Если же точки в пространстве разбросаны на большие расстояния, т. е. не принадлежат одной области, то согласованность мнений экспертов невысокая. Возможно, что точки — мнения экспертов — расположены в пространстве так, что образуют две или несколько компактных групп. Это означает, что в экспертной группе существуют две или несколько существенно отличающихся точек зрения на оценку объектов исследования. Может быть область точек, не образующих совокупности мнений — размытая область. В этом случае не удалось обнаружить точек зрения на решаемую проблему. Лицо, принимающее решение, может повторить экспертизу или принять какое-либо решение самостоятельно.

Конкретизация изложенной идеи оценки согласованности мнений экспертов производится в зависимости от использования количественных или качественных шкал измерения и выбора меры степени согласованности.

При использовании количественных шкал измерения и оценке всего одного объекта все мнения экспертов можно представить как точки на числовой оси. Эти точки можно рассматривать как реализации случайной величины и поэтому для оценки центра группировки и разброса точек представляется возможным использовать хорошо разработанные методы математической статистики. Центр группировки точек можно определить как математическое ожидание (среднее значение) или медиану случайной

величины, разброс количественно оценивается дисперсией случайной величины. Мерой согласованности оценок экспертов, т. е. компактности расположения точек на числовой оси, может служить отношение среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию случайной величины.

Если объект оценивается несколькими числовыми параметрами, то мнение каждого эксперта представляется как точка в пространстве параметров. Центр группировки точек опять вычисляется как математическое ожидание вектора параметров, а разброс точек — дисперсией вектора параметров. Мерой согласованности суждений экспертов может служить в этом случае сумма расстояний оценок от среднего значения, отнесенная к расстоянию математического ожидания от начала координат. Мерой согласованности может служить количество точек, расположенных в радиусе среднеквадратического отклонения от математического ожидания, ко всему количеству точек. Различные методы определения согласованности количественных оценок на основе понятия компактности (близости) рассматриваются в теории группировок и распознавания образов.

При измерении объектов в порядковой шкале согласованность оценок экспертов в виде ранжировок или парных сравнений объектов также основывается на понятии компактности.

Метод простого ранжирования заключается в том, что каждый эксперт располагает признаки в порядке предпочтения. Цифрой 1 обозначается наиболее важный признак, цифрой 2 — следующий по важности и т. д. Полученные результаты сводятся в таблицу, общий вид которой представлен в таблице 8.2.

Таблица 8.2

Сводная таблица результатов

Признаки или объект оценки	Эксперты					
	1	2	3	4	s	d
X_1	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{1s}	r_{1d}
X_2	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	r_{2s}	r_{2d}
X_3	r_{31}	r_{32}	r_{33}	r_{34}	r_{3s}	r_{3d}
X_i	r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}	r_{i4}	r_{is}	r_{id}
X_m	r_{m1}	r_{m2}	r_{m3}	r_{m4}	r_{ms}	r_{md}

После того как данные от экспертов собраны, проводится обработка полученных оценок.

При ранжировании объектов используется мера согласованности мнений группы экспертов — **дисперсионный коэффициент конкордации** (коэффициент согласия).

Рассмотрим матрицу (табл. 8.2) результатов ранжировки m объектов группой из d экспертов:

$$\|r_{is}\| \quad (s = \overline{1, d}), (i = \overline{1, m}),$$

где: r_{is} — ранг, присваиваемый s -экспертом i -му объекту.

Составим суммы рангов по каждой строке. В результате получим вектор с компонентами:

$$r_{is} = \sum_{s=1}^d r_{is}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Будем рассматривать величины r_i как реализации случайной величины и найдем оценку дисперсии. Как известно, оптимальная по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценка дисперсии определяется формулой:

$$D = \frac{1}{1-m} \sum_{i=1}^m (r_i - \bar{r})^2, \quad (8.1)$$

где: $\bar{r}$ — оценка математического ожидания (средний ранг), равная:

$$\bar{r} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i. \quad (8.2)$$

Дисперсионный коэффициент конкордации определяется как отношение оценки дисперсии (8.1) к максимальному значению этой оценки:

$$W = \frac{D}{D_{\max}}. \quad (8.3)$$

Коэффициент конкордации изменяется от нуля до единицы, поскольку $0 \leq D \leq D_{\max}$.

Максимальное значение дисперсии равно:

$$D_{\max} = \frac{d^2(m^3 - m)}{12(m-1)}. \quad (8.4)$$

Введем обозначение:

$$S = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{s=1}^d r_{is} - \bar{r} \right)^2. \quad (8.5)$$

Используя (8.5), запишем оценку дисперсии (8.1) в виде:

$$D = \frac{1}{m-1} S. \quad (8.6)$$

Подставляя (8.4), (8.6) в (8.3) и сокращая на множитель $(m-1)$, запишем окончательное выражение для коэффициента конкордации:

$$W = \frac{12}{d^2(m^3 - m)} S. \quad (8.7)$$

Данная формула определяет коэффициент конкордации для случая отсутствия связанных рангов. При $W = 0$ согласованность оценок различных

экспертов отсутствует, а при $W = 1$ согласованность мнений экспертов полная.

При крайних коэффициентах конкордации могут быть даны следующие рекомендации. Если $W = 0$, то для получения достоверных оценок следует уточнить исходные данные о событиях и (либо) изменить состав группы экспертов. При $W = 1$ не всегда можно считать оценки объективными, поскольку может оказаться, что все члены экспертной группы условились придерживаться одинаковых взглядов.

Необходимо, чтобы найденное значение W было больше заданного значения W_3 ($W > W_3$). Обычно принимается $W = 0,5$, т. е. при $W > 0,5$ выводы экспертов согласованы в большей мере (сходятся в оценке событий), чем несогласованы. При $W < 0,5$ оценки нельзя считать в достаточной степени согласованными.

При наличии связных рангов коэффициент конкордации вычисляется по формуле:

$$W = \frac{12S}{d^2(m^3 - m) - d \sum_{s=1}^d T_s}, \quad (8.8)$$

где:

$$T_s = \sum_{k=1}^{H_s} (h_k^3 - h_k). \quad (8.9)$$

В формуле (8.9) T_s — показатель связных рангов в s -й ранжировке, H_s — число групп равных рангов в s -й ранжировке, h_k — число равных рангов в k -й группе связных рангов при ранжировке s -м экспертом. Если совпадающих рангов нет, то $H_s = 0$, $h_k = 0$ и, следовательно, $T_s = 0$. В этом случае формула (8.9) совпадает с формулой (8.7).

Коэффициент конкордации представляет собой случайную величину. Оценка значимости W может быть произведена по критерию Пирсона χ^2 . Величина $d(m-1)W$ имеет $\chi^2 =$ распределение с $\nu = m - 1$ степенями свободы.

При наличии связных рангов $\chi^2 =$ распределение с $\nu = m - 1$ степенями свободы имеет величину:

$$\chi^2 = 12S / \left[dm(m+1) - \frac{1}{m-1} \sum_{s=1}^d T_s \right]. \quad (8.10)$$

ПРИМЕР 8.1. Результаты ранжировки шести объектов (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 и X_6) пятью экспертами (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5) представлены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Сводная таблица результатов ранжирования

Объект	Эксперты				
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
X_1	1	2	1,5	1	2
X_2	2,5	2	1,5	2,5	1
X_3	2,5	2	3	2,5	3
X_4	4	5	4,5	4,5	4
X_5	5	4	4,5	4,5	5,5
X_6	6	6	5	5	5,5

Вычислим коэффициент конкордации и произведем оценку его значимости. Среднее значение $\bar{r}$ по формуле (8.2) равно:

$$\bar{r} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^d r_{is} = 17,5.$$

Величина S в соответствии с формулой (8.5) равна:

$$S = \sum_{i=1}^6 \left(\sum_{s=1}^5 r_{is} - 17,5 \right)^2 = 361.$$

Поскольку в ранжировке имеются связанные ранги, то вычисление коэффициента конкордации выполняется по формуле (8.8). Предварительно вычисляются T_s , используя формулу (8.9). В данном примере из табл. 8.3 следует, что в ранжировке экспертом s_1 имеется одна группа связанных рангов, поэтому $H_1 = 1$, а в этой группе содержится два связанных ранга, равных 2,5, поэтому $k = 1$ и $h_1 = 2$. Отсюда $T_1 = 2^3 - 2 = 6$. Аналогичным образом вычисляются $T_2 \dots T_5$:

$$T_2 = 3^3 - 3 = 24; T_3 = 2^3 - 2 + 2^3 - 2 = 12;$$

$$T_4 = 2^3 - 2 + 2^3 - 2 = 12; T_5 = 2^3 - 2 = 6.$$

Подставляя значения T_s , S и $m = 6$, $d = 5$ в формулу (8.8) и произведя вычисления, получаем:

$$W = 12 \times 361 / [5^2(6^3 - 6) - 5 \times 60] = 0,874.$$

Оценим значимость коэффициента конкордации. В данном случае число степеней свободы $\nu = m - 1 = 6 - 1 = 5$. Табличное значение $\chi^2_{табл}$ для $\nu = 5$ и 5 % уровня значимости равно 11,07 (табл. 8.4). Вычисляя значение χ^2 по формуле (8.10), получаем:

$$W = 12 \times 361 / [5^2(6^3 - 6) - 5 \times 60] = 0,874.$$

Поскольку $11,07 < 21,8$, то гипотеза о согласии экспертов в ранжировках принимается.

Таблица 8.4

Значение χ^2 в зависимости от ν и p^*

n	p						
	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005
1	1,07	1,64	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	2,41	3,22	4,61	5,99	7,38	9,21	10,6
3	3,67	4,64	6,25	7,81	9,35	11,3	12,8
4	4,88	5,99	7,78	9,49	11,07	13,3	14,9
5	6,06	7,29	9,24	11,07	12,8	15,1	16,7
6	7,23	8,56	10,6	12,6	14,4	16,8	18,5
7	8,38	9,80	12,0	14,1	16,0	18,5	20,3
8	9,52	11,0	13,4	15,5	17,5	20,1	22,0
9	10,7	12,2	14,7	16,9	19,0	21,7	23,6
10	11,8	13,4	16,0	18,3	20,5	23,2	25,2
11	12,9	14,6	17,3	19,7	21,9	24,7	26,8
12	14,0	15,8	18,5	21,0	23,3	26,2	28,3
13	15,1	17,0	19,8	22,4	24,7	27,7	29,8
14	16,2	18,2	21,1	23,7	26,1	29,1	31,3
15	17,3	19,3	22,3	25,0	27,5	30,6	32,8
16	18,4	20,5	23,5	26,3	28,8	32,0	34,3
18	20,6	22,8	26,0	28,9	31,5	34,8	37,2
20	22,8	25,0	28,4	31,4	34,2	37,6	40,0
22	24,9	27,3	30,8	33,9	36,8	40,3	42,8
24	27,1	29,6	33,2	36,4	39,4	43,0	45,6
26	29,2	31,8	35,6	38,9	41,9	45,6	48,3
28	31,4	34,0	37,9	41,3	44,5	48,3	51,0
30	33,5	36,3	40,3	43,8	47,0	50,9	53,7

* ν — число степеней свободы; p — вероятность того, что χ^2 принимает значение больше указанного в таблице.

8.7. Групповая оценка и выбор предпочтительного решения

После того как каждый эксперт произвел ранжирование объектов исследования (мероприятий, вариантов, схем и пр.), необходимо дать обобщен-

ную групповую оценку, упорядочить оцениваемые варианты и выбрать наиболее предпочтительный.

В соответствии с гипотезой о том, что эксперты являются достаточно «точными измерителями», групповая оценка строится на основе применения методов сравнения. Это соответствует тому, что индивидуальные оценки экспертов образуют компактную группу и в качестве наиболее согласованной групповой оценки используется математическое ожидание (среднее значение) или медиана (наиболее вероятная оценка).

Рассмотрим наиболее простой (но достаточно надежный и универсальный) метод, когда эксперты производят измерение объектов в порядковой шкале путем ранжирования, где величины r_{is} есть ранги. Задачей обработки является построение **обобщенной ранжировки** по **индивидуальным ранжировкам** экспертов. В этом случае используется **метод парных сравнений**, который целесообразно рассмотреть в виде последовательности шагов.

1. Каждый эксперт проводит попарную оценку приоритетности признаков и заполняет свою матрицу парных сравнений $E_s = \|I_{iks}\|$, элементы которой в зависимости от выбора эксперта определяются по правилу:

$$I_{iks} = \begin{cases} 1, & \text{если } r_{ks} \geq r_{is} \\ 0, & \text{если } r_{ks} < r_{is} \end{cases} \quad (8.11)$$

где: r_{is} и r_{ks} — ранги, ранее присвоенные s -экспертом i -му и k -му объектам. Поскольку имеется d экспертов и каждый из них дает свою матрицу парных сравнений (МПС), то число МПС равно числу экспертов.

ПРИМЕР 8.2. Дана ранжировка объекта одним экспертом (s_1):

O_1	O_2	O_3	O_4	O_5
5	4	4	3	2

В этом случае элементы следует записать как: $O_1 > O_2 \approx O_3 > O_4 > O_5$. Составим таблицу МПС и произведем парное сравнение по строкам согласно правилу (8.11), при этом оценка будет выглядеть следующим образом:

строка 1: $O_1 = O_1[1]$; $O_1 > O_2[1]$; $O_1 > O_3[1]$; $O_1 > O_4[1]$; $O_1 > O_5[1]$;

строка 2: $O_2 < O_1[0]$; $O_2 = O_2[1]$; $O_2 = O_3[1]$; $O_2 > O_4[1]$; $O_2 > O_5[1]$ и далее аналогичным порядком. Тогда МПС для этой ранжировки примет вид:

	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5
O_1	1	1	1	1	1
O_2	0	1	1	1	1
O_3	0	1	1	1	1
O_4	0	0	0	1	1
O_5	0	0	0	0	1

2. Определяется сумма матриц всех экспертов. Суммирование проводится по элементам матриц и может быть представлено следующей формулой:

$$Z_{ik} = n \sum_{s=1}^d I_{iks}, \quad k_s = \overline{1, d}. \quad (8.12)$$

3. Определяется результирующая матрица, каждый элемент которой определяется по правилу:

$$R_{iks} = \begin{cases} 1, & \text{если } Z_{is} \geq d/2 \\ 0, & \text{если } Z_{is} < d/2, \quad k_s = \overline{1, d}. \end{cases} \quad (8.13)$$

4. Находится сумма баллов, которую набрал каждый признак k :

$$B_k = \sum_{i=1}^m R_{ik}, \quad k_s = \overline{1, d}. \quad (8.14)$$

ПРИМЕР 8.3. Для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу на сталелитейном заводе предлагается четыре альтернативных варианта фильтрации отходящих газов. Для оценки этих вариантов была создана группа из пяти экспертов. Был использован метод парных сравнений. На основе парных сравнений альтернативных вариантов от каждого эксперта получены МПС, показанные ниже.

Эксперт 1

Мероприятия	M_1	M_2	M_3	M_4
M_1	1	1	1	1
M_2	0	1	1	1
M_3	0	0	1	1
M_4	0	0	0	1

Эксперт 2

Мероприятия	M_1	M_2	M_3	M_4
M_1	1	0	1	1
M_2	1	1	1	1
M_3	0	0	1	0
M_4	0	0	1	1

Эксперт 3

Мероприятия	M_1	M_2	M_3	M_4
M_1	1	0	0	1
M_2	1	1	1	1
M_3	1	0	1	1
M_4	0	0	0	1

Эксперт 4

Мероприятия	M_1	M_2	M_3	M_4
M_1	1	1	1	1
M_2	0	1	1	1
M_3	0	0	1	0
M_4	0	0	1	1

Эксперт 5

Мероприятия	M_1	M_2	M_3	M_4
M_1	1	0	1	0
M_2	1	1	1	0
M_3	0	0	1	0
M_4	1	1	1	1

Суммируя полученные МПС от каждого эксперта, получаем матрицу:

Мероприятия	M_1	M_2	M_3	M_4
M_1	5	2	4	4
M_2	3	5	5	4
M_3	1	0	5	2
M_4	1	1	3	5

Поскольку число экспертов равно пяти, результирующую матрицу следует определить по правилу (8.13) на базе сопоставления с порогом $d/2 = 5/2 = 2,5$:

Мероприятия	M_1	M_2	M_3	M_4
M_1	1	0	1	1
M_2	1	1	1	1
M_3	0	0	1	0
M_4	0	0	1	1

Проведя суммирование элементов результирующей матрицы по строкам, получим баллы, которые набрали варианты фильтрации (мероприятия) на основе проведенной экспертизы: M_1 — 3 балла, M_2 — 4 балла, M_3 — 1 балл, M_4 — 2 балла. Наибольшее число баллов набрал вариант M_2 , который, по мнению экспертов, представляется наиболее приоритетным и получает 1 ранг.

8.8. Принятие решения

После установления опасностей руководитель группы должен удостовериться, что все ее члены имеют четкое представление о них. Только после этого можно приступать к обсуждению и принимать принципиальные решения по следующим вопросам:

- участок для размещения системы;
- местоположение системы в пределах отведенного участка (границы участка, расположение других установок и т.д.);
- отдельные элементы, требующие специальной доработки для устранения возможных опасностей;
- проведение дополнительных исследований для получения информации (токсичность, воспламеняемость и т.д.), необходимой для разработки эффективных мер защиты конструкции.

Первый шаг, предпринимаемый в технологии решения, заключается в анализе проблем и формировании решения.

Анализ проблем. Необходимо найти причину определенной ситуации. Процесс заключается из нескольких последовательных шагов:

- сборе фактов, относящихся только к рассматриваемой проблеме (опасности, системе);

- рассмотрение возможного соотношения *«причина-последствие»* среди отобранных фактов;
- исключение второстепенных, незначущих факторов;
- выявление конечной причины и определение проблемы.

Формирование решения. После определения проблемы необходимо принимать решения для ее разрешения. Процесс решения может рассматриваться в виде следующей логической последовательности:

- определение желаемых целей;
- подготовка альтернативных решений;
- проверка разных решений;
- выбор наилучшего варианта.

Участие и качество решения. Участие экспертов в выработке решения является необходимым, так как руководитель группы может упустить из вида ряд важных обстоятельств.

Качество группового решения лучше качества индивидуальных решений. Группа, по сравнению с отдельными экспертами, находится в лучшем положении для решения сложных проблем в силу того, что каждое отдельное лицо обладает конкретной информацией по отдельной проблеме.

Для окончательного этапа — принятия решения, возможны две совершенно противоположные точки зрения:

- устранять каждую опасность по мере ее выявления, прежде чем переходить к поиску следующей опасности;
- не начинать решения проблемы до выявления всех опасностей.

На практике всегда можно найти компромисс. С другой стороны, если системе угрожает разрушение, или ее опасное состояние повлечет за собой угрозу здоровью и безопасности людей как на предприятии, так и вне его, следует немедленно принимать решение на исключение такого рода опасных состояний.

Любая серьезная проблема должна решаться на основе получения более полной информации с последующей корректировкой наряду с эффективным контролем за проведением исследований.

Иногда результатом обсуждений проблемы в основном (или исключительно) являются вопросы, ответы на которые должны быть получены позже. Руководитель группы должен подобрать эти вопросы и распространить их среди членов группы. Через некоторое время группа снова собирается на совещание, которое называется «Заседание по оценке и действиям». На этих заседаниях рассматривается каждый вопрос, отмечается прогресс и там, где это возможно, принимаются решения. На одном таком заседании могут рассматриваться результаты двух и трех предшествующих совещаний экспертов.

При обнаружении опасности необходимо как можно быстрее принять решение относительно мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации системы, так как в большинстве случаев уже известны способы решения проблемы.

8.9. Работа на завершающем этапе

Работа после завершения заседания экспертов обычно состоит в следующем. В случае принятия решений относительно изменений в конструкции или в режимах работы системы, информация об этом должна быть доведена до сведения ответственных лиц, а также должны быть приняты практические меры по устранению опасностей.

Можно предложить следующие виды действий по устранению опасностей:

- изменения в производственном процессе (рецептура, материалы и т. д.);
- изменение условий процесса (давление, температура и т. д.);
- изменения в конструкции;
- изменение режима работы.

Очень важно рассмотреть широкий диапазон возможных действий, имея в виду, что каждую опасность можно и должно устранить простым и в месте с тем эффективным приемом.

При выборе возможных корректирующих действий целесообразно разделить их на две категории:

- действия по устранению причин опасности;
- действия по ликвидации последствий.

В общем, гораздо эффективнее устранять причину опасности, а при условии проведения экспертизы на стадии проектирования это может быть выполнено без особых затрат. В случае невозможности быстрого устранения опасности группа должна рассмотреть рекомендации по обеспечению защиты работающих и оборудования при аварии.

Устранение опасности — набор определенных действий, предусматривающий рассмотрение ряда возможностей по их предотвращению.

Для иллюстрации рассмотрим химический реактор, при обследовании которого на заседании экспертов обнаружено, что поступление в него примеси с исходными материалами может вызвать в нем внезапное выделение газа и повышение давления.

Допустим, что опасность можно ликвидировать следующим образом:

- 1) устранив возможность выделения газа путем замены исходного материала;
- 2) устранив возможность выделения газа с помощью изменения одного из условий технологического процесса;
- 3) установив соответствующие предохранительные клапаны и газоотводную систему для обеспечения защиты.

Решение 1 дает 100 %-ную эффективность и должно быть выбрано в первую очередь.

К решению 2 следует относиться с осторожностью, так как оно зависит от надежности системы управления (системы регулирования), определяющей условия технологического процесса.

Решение 3 даст положительный результат только при условии установки специальной системы для отвода выделяющегося в реакторе газа и достаточной надежности этой системы.

После принятия решений об изменении конструкции, рабочего режима и других мероприятий часто возникает необходимость в повторной проверке проекта для того, чтобы удостовериться, что эти изменения не вызовут новые, непредвиденные опасности.

И, наконец, следует подчеркнуть, что работа не должна завершаться до устранения всех выявленных опасностей путем применения соответствующих мер.

Выполнение этих целей поможет как администрации предприятия, так и местным органам власти в оценке уровня безопасности систем, даст фактическую информацию о предприятии, производственных процессах и зданиях, расположенных по соседству с ним, а также позволит судить о характере, вероятности и масштабе потенциальных крупных аварий и методах их контроля.

Наконец, если произойдет авария или несчастный случай, власти должны сразу же иметь об этом информацию, независимо от той, которая им представляется для контроля аварийных ситуаций вне производственных территорий, когда очень важно установление незамедлительного контакта с администрацией производства.

Г Л А В А 9

Мероприятия, методы и средства обеспечения надежности и безопасности технических систем

Пути обеспечения надежности разнообразны и могут быть связаны с повышением стойкости изделия к внешним воздействиям. Например, для механических систем относят 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 — это 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 для обеспечения длительного выполнения системой своего служебного назначения в различных условиях эксплуатации.

Не менее значимым является обучение персонала вопросам безопасной эксплуатации 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.

9.1. Стадия проектирования технических систем

Предупредительные: использование отработанных методов и средств обеспечения надежности; анализ альтернативных проектно-конструкторских решений и выбор наилучших; создание запасов работоспособности

по нагрузкам и отказам различных видов; использование резервирования; выбор высоконадежных комплектующих элементов, материалов; создание контролепригодных и ремонтпригодных элементов; обучение проектантов, конструкторов, испытателей передовым методам и способам обеспечения надежности; установление проектных норм надежности и норм испытаний при экспериментальной отработке; разработка новых средств контроля и диагностики.

Контрольные: экспериментальная проверка технических решений, особенно новых; проверка всех режимов функционирования; автономные и комплексные испытания; контроль и корректировка конструкторской документации; экспериментальная проверка запасов работоспособности во всех режимах функционирования; контроль надежности; контроль качества труда исполнителей, самоконтроль.

Защитные: анализ видов и последствий отказов; введение специальных приборов в состав системы, обеспечивающих безопасность при возникновении отказов; отработка основных отказовых режимов функционирования; тренировка персонала; реализация технических решений по локализации отказов; применение оперативного контроля и управление функционированием; обеспечение сохранения работоспособности элемента при отказах в системах; разработка системы обслуживания и восстановления техники.

9.2. Стадия изготовления технических систем

Предупредительные: выбор прогрессивных и стабильных технологических процессов; отработка новых технологических процессов и средств контроля до начала пуска производства; отработка и корректировка технологической документации; обучение и аттестация производственного персонала к работе на ответственных операциях; надзор за состоянием производственного оборудования и средств контроля.

Контрольные: проведение входного пооперационного и выходного контроля; проверка режимов запасов; контрольно-технологические испытания; контроль качества труда исполнителей, самоконтроль; авторский надзор; контроль качества и стабильности технологических процессов.

Защитные: использование избыточности (дублирование) в оборудовании и средствах контроля; введение блокировок в ответственные технологические процессы; разработка системы обслуживания и восстановления производственного оборудования и средств контроля.

9.3. Стадия эксплуатации технических систем

Предупредительные: использование автоматизированных средств контроля и поиска неисправностей; отработка эксплуатационно-технической

документации; проведение предварительных регламентных работ; оценка и прогнозирование технического состояния и надежности; аттестация и обучение персонала.

Контрольные: автоматизированная регистрация и обработка информации о командах, отказах и неисправностях; контроль качества; самоконтроль; гарантийный надзор.

Защитные: проведение оперативных доработок; использование автоматических средств защиты; использование запасных частей, обменного фонда; анализ последствий отказов и реализация защитных мероприятий; обучение и аттестация персонала для работы при возникновении отказов.

9.4. Техническая поддержка и обеспечение

Технические средства (элементная база, экспериментальные и производственные возможности) являются важнейшей составной частью активных средств, позволяющих, в конечном счете, добиться высокой безопасности и эффективности техники. Отсутствие материально-технической основы высокой надежности техники не может быть скомпенсировано другими средствами обеспечения (организацией работ, реализацией программного подхода, методического, нормативного или информационного обеспечения).

Уровень технического обеспечения зависит от следующих факторов:

- уровня качества и надежности материалов, полуфабрикатов, электро- и радиодеталей, комплектующих элементов, агрегатов и изделий общего назначения, выпускаемых промышленностью и используемых в составе технических систем;
- технического уровня, номенклатуры, количества, производительности, автоматизации технических средств для проектирования, конструирования, отработки, производства, контроля и эксплуатации сложных изделий;
- уровня автоматизации и оперативного сбора, обработки, обмена информацией для планирования, координации и контроля за ходом создания и применения изделий.

Для создания высоконадежных и эффективных систем необходимо, чтобы новые материалы, электронные изделия и др. комплектующие обладали высокими показателями надежности, достаточными для практически безотказной эксплуатации перспективных систем в определенных для них условиях в течение срока эксплуатации, равного сроку их морального старения.

Чем сложнее создаваемые системы, тем больше в системе причин и источников отказов, тем проблематичнее возможность обеспечения надежности на уже достигнутом научно-техническом уровне технических средств проектирования, конструирования, экспериментальной отработки, производства и эксплуатации.

9.5. Технические средства обеспечения надежности и безопасности технических систем

Все технические средства обеспечения надежности и безопасности, которые используют при создании и эксплуатации технических систем, могут быть условно разделены на три класса: средства предупреждения, средства контроля и средства защиты.

9.5.1. Средства предупреждения отказов

Средства предупреждения отказов техники одновременно являются и техническими средствами, позволяющими выбрать и детально разработать наилучшую конструкцию, оформить документацию, обеспечить полную экспериментальную обработку.

К числу технических средств, используемых для предупреждения отказов и отклонений конструктивного характера, относят:

- автоматизированные цифровые и аналого-цифровые комплексы моделирования, имеющие необходимое математическое обеспечение и позволяющие проектантам разрабатывать большое число альтернативных вариантов элементов системы и выбирать наиболее надежные и эффективные;
- средства автоматизированной разработки конструкторской и технологической документации, позволяющие исключить ошибки в документации и значительно ускорить её разработку;
- современное экспериментальное оборудование, позволяющее своевременно отрабатывать новые технические решения, обеспечить высокую надежность элементов;
- технические средства обучения и повышения квалификации проектантов, конструкторов и других сотрудников предприятий-разработчиков;
- автоматизированную систему информации по вопросам качества и надежности элементов.

К числу технических средств, предупреждающих отказы и отклонения производственного характера, относят:

- прогрессивное автоматизированное производственно-технологическое оборудование, средства контроля и управления технологическими процессами;
- технические средства входного неразрушающего контроля и диагностики, исключающие попадание в производство недостаточно качественных материалов, полуфабрикатов и комплектующих элементов;
- автоматизированные средства обучения рабочих и инженерно-технических работников предприятий-изготовителей;
- автоматизированную систему информации по качеству и надежности систем в производстве.

К числу технических средств предупреждения отказов в эксплуатации относят:

- технические средства для отработки эксплуатационной документации (стенды, макеты, имитаторы) и обучения эксплуатирующего персонала;
- автоматизированные средства контроля, диагностики и поиска неисправностей;
- технические средства для проведения предупредительных и регламентных работ.

9.5.2. Средства контроля

К числу технических средств, обеспечивающих контроль и выявление отказов конструктивного характера, относят:

- экспериментальную базу, достаточную для контроля правильности заложенных технических решений, проверки запасов работоспособности элементов во всех режимах функционирования, контроля надежности;
- технические средства контроля и корректировки конструкторской документации, качества труда исполнителей.

Технические средства контроля надежности в производстве технических систем предназначены для осуществления следующих функций:

- проведения эффективного входного, пооперационного и приёмочного контроля качества элементов;
- проверки режимов функционирования, запасов работоспособности, проведения контрольно-технологических испытаний;
- контроля качества сборки и совместного функционирования групп элементов;
- контроля качества технологической документации, стабильности технологических процессов, качества труда исполнителей.

Технические средства контроля надежности в эксплуатации:

- технические средства неразрушающего контроля и диагностики;
- автоматизированные средства регистрации и обработки информации о результатах функционирования элементов систем, об отказах и неисправностях;
- технические средства прогнозирования работоспособности элементов, контроля и поиска неисправностей;
- автоматизированные средства контроля качества работы операторов.

9.5.3. Средства защиты

К числу технических средств защиты, используемых для недопущения отказов или устранения последствий отказов, относят:

- технические средства локализации отказов, вводимые в состав системы;
- технические средства оперативного контроля и управления функционированием при возникновении опасных ситуаций;

- блокировки в ответственных технологических процессах, исключающие возможность разрушения элементов системы при нарушении технологического процесса;

В процессе эксплуатации для уменьшения ущерба от возможных отказов предусматривают следующие технические средства:

- пожаро-, взрывобезопасности и пожаротушения;
- автоблокировки, исключающие прохождение и выполнение неправильных команд;
- предупреждения ошибочных действий операторов.

При разработке новых систем необходимо с опережением создавать и применять на каждой стадии технические средства:

- предупреждения отказов и отклонений от намеченного хода технологического процесса;
- средства оперативного контроля и выявления причин;
- средства защиты от вредных последствий отказов и отклонений.

Таким образом, средства защиты — это совокупность организационных и технических средств, используемых в системах для поддержания заданного режима технологических процессов, предотвращения аварийных ситуаций и (или) повреждения элементов систем. Такое множество взаимосвязанных и взаимодействующих средств именуется **защитной автоматикой**.

Защитная автоматика применяется для определения состояния оборудования (например, «включено или выключено»), степени загрузки (например, дозаторов химического реактора), наличия материала, скорости его движения, температуры и давления потока и др. технологических параметров.

По функциональному признаку в защитной автоматике выделяют автоматический контроль, измерение, сигнализацию, защиту и блокировку.

Автоматический контроль и измерения проводятся дискретно или непрерывно. На предприятиях в зависимости от способа передачи показаний различают контроль местный и централизованный (дистанционный). При местном контроле показывающие приборы устанавливаются на объекте контроля, при централизованном — диспетчерском пульте. При контроле предельных положений регистрируются только параметры, соответствующие этим положениям, при непрерывном контроле происходит непрерывное или повторяющееся через небольшие промежутки времени измерение параметров.

Сигнализация предназначена для передачи контрольных, управляющих (командных) и информационных сигналов по каналам и линиям связи, например оператору или диспетчеру.

Различают сигнализацию **предупредительную** — для предупреждения обслуживающего персонала о пуске тех или иных механизмов, **распорядительную** — для пуска и отключения систем оператором, **исполнительную** — для контроля выполнения распоряжений, **аварийную** — для оповещения обслуживающего персонала о нарушении нормального хода процессов. Для сиг-

нализации о состоянии распределенных объектов используют телекоммуникацию.

Блокировка — совокупность методов и средств, обеспечивающих фиксацию рабочих частей (элементов) системы или электрической цепи в определенном состоянии (положение), которое сохраняется независимо от того, устранено или нет блокирующее воздействие, чем достигается как безопасность оборудования, так и безопасность обслуживания.

9.6. Организационно-управленческие мероприятия

9.6.1. Техническое обслуживание, ремонтные работы и инспектирование

Функционирование систем непосредственным образом зависит от технического обслуживания и ремонта этих систем. По этой причине очень важно разработать график технического обслуживания и контроля работы как технологических систем, так и систем безопасности, в который входит выполнение следующих задач:

а) проверка условий работы систем безопасности, как в испытательных помещениях, так и на рабочих местах;

б) проверка исправности оборудования в системах безопасности на рабочих местах, например, путем визуального осмотра или дистанционного контроля;

в) мониторинг питающих устройств в системах безопасности (при подаче электрического тока, пара, охладителя, сжатого воздуха и т. п.)

г) разработка графика технического обслуживания и соответствующей документации с указанием различных интервалов техобслуживания и типов производящихся работ.

Кроме того, в этих графиках могут указываться необходимые квалификации и уровень профессиональных навыков персонала для выполнения конкретного вида работ.

Ремонтные работы из-за их низкого качества могут быть одной из причин возникновения опасностей. Поэтому должны быть разработаны подробные инструкции по проведению ремонтов. В них должны входить квалификационные требования к обслуживающему персоналу, а также требования контроля этих работ. В связи с особой важностью этих требований администрация может разрабатывать собственные стандарты на ремонтные работы, иногда с более жесткими требованиями, чем в государственных стандартах.

Необходимо разработать план инспекций и испытаний промышленных систем, график проведения которых должен строго соблюдаться. Инспекторской проверке должен быть подвергнут инженерный и административный контроль за опасностями.

Инспекции и испытание следует выполнять применительно к следующему оборудованию процесса:

- сосудам высокого давления и резервуарам транспортировки (если это транспорт предприятия) и хранения;
- системам трубопроводов, включая компоненты трубопроводов, такие как запорная арматура, фланцы и пр.;
- системам и устройствам сброса давления и регулирования вентиляции;
- системам аварийного отключения;
- системам управления, включая устройства слежения, датчики, аварийную сигнализацию и устройства блокировки;
- насосам;
- компрессорам и воздухосборникам при них.

Инспекторской проверке должны быть подвергнуты протоколы (журналы), регистрирующие обучение и инструктаж персонала, эксплуатирующего оборудование, инструкции по технической эксплуатации и обслуживанию, ремонтным работам, действиям персонала в нештатных ситуациях на предмет выявления соответствия и полноты указанных мероприятий целям безопасности и требованиям стандартов по обеспечению целостности оборудования процесса.

Для подтверждения того, что оборудование установлено правильно и в соответствии со спецификациями проекта и инструкциями завода-изготовителя, что системы подходят для процесса, должны быть выполнены соответствующие проверки и инспекции. Это положение касается также установления пригодности материалов, используемых для технического обслуживания, запасных частей и приспособлений, применяемых при ремонтных работах.

Инструкции инспекций и испытаний должны следовать общепринятой инженерной практике и проводиться с периодичностью, рекомендованной изготовителем, а при необходимости (устанавливается по предшествующему опыту эксплуатации), и чаще.

Руководство предприятия **должно документировать** каждую инспекцию или испытание, которое было выполнено на оборудовании технологических процессов. Документация должна содержать дату инспекции или испытания, фамилию лица, которое провело инспекцию или испытание, серийный номер или другой идентификатор оборудования, на котором инструкция или испытание было проведено, описание выполненной инспекции или испытания, ее (его) результаты.

Технический персонал предприятия **должен устранить неисправности** или перед дальнейшим использованием системы, или по плану-графику, если немедленно были предприняты необходимые меры для обеспечения безопасности эксплуатации.

9.6.2. Управление изменениями в технологическом процессе

Перед тем как вносить какие-либо изменения в технологию процесса, в используемые системы, в другие объекты, которые влияют на технологический процесс, необходимо рассмотреть и оценить:

- техническую базу для предлагаемого изменения;
- влияние изменения на безопасность и здоровье работников предприятия, населения;
- экологическую безопасность;
- изменение эксплуатационных процедур;
- срок, необходимый для реализации изменений;
- требования, для предлагаемого изменения.

Персонал, вовлеченный в эксплуатацию систем и техническое обслуживание, должен до внесения изменений и пуска технологического процесса быть проинформирован об изменениях, и пройти соответствующее обучение.

Если изменение затрагивает информацию и инструкции по безопасности процесса и эксплуатации систем, то они должны быть соответствующим образом откорректированы.

9.6.3. Обучение

Несмотря на то, что в обеспечении безопасности важное место занимает технические средства, без участия человека никакое производство вообще работать не будет. Поскольку на уровень безопасности люди могут оказывать как позитивное, так и негативное влияние, крайне необходимо снизить последнее и всячески поддерживать первое. Обе цели могут быть достигнуты путем правильного подбора и **первичного** обучения персонала, в которое должна быть включена информация:

- об опасностях, связанных с производственными процессами и используемыми веществами, и уровнях риска;
- об инструкциях, необходимых при работе;
- о возможных условиях работы, включая процедуры включения и выключения промышленной установки;
- о рекомендуемом поведении людей при нарушении режимов работы системы, аварии или несчастных случаях;
- о несчастных случаях и ситуациях, близких к аварийным, на других аналогичных производствах.

Повторное обучение должно проводиться, по крайней мере, каждые три года (или чаще, по мере необходимости) для каждого работника, включенного в эксплуатацию технических систем, для подтверждения того, что работник понимает и твердо придерживается действующих эксплуатационных инструкций. Руководитель должен определить во время консультаций с работниками, вовлеченными в эксплуатацию процесса, периодичность повторного обучения.

Руководителю необходимо удостовериться, что каждый работник, вовлеченный в процесс, получил и усвоил требуемое обучение. Результаты обучения и аттестации персонала должны быть оформлены соответствующим образом.

9.7. Диагностика нарушений и аварийных ситуаций в технических системах

Определение технического состояния системы в ходе эксплуатации или после ремонта называют техническим диагностированием. С помощью технической диагностики предсказывают возможные отклонения в режимах работы и состояниях машин, аппаратов и устройств, а также разрабатывают методы и средства обнаружения и локализации неисправностей в системах. Различным нарушениям системы соответствуют определенные технические состояния. Техническим состоянием называют совокупность свойств системы, подверженных изменениям в процессе ее производства или эксплуатации. Эти свойства характеризуются признаками (требованиями, параметрами), устанавливаемыми нормативно-технической документацией на систему. Введение переменной состояния функционирования h позволяет каждому значению h ставить в соответствие определенное техническое состояние.

Совокупность средств, правил и алгоритмов диагностирования образует систему технического диагностирования (СТД).

Основные задачи диагностирования при проектировании — проверка соответствия разработанной системы исходному заданию на проектирование и обеспечение наилучшего режима и высокого качества диагностики системы на последующих этапах на предмет установления возможных отказов. Одновременно с проектированием системы создают СТД. Так как значительная доля аварий связана с ошибками при проектировании, а стоимость каждой пропущенной ошибки исключительно велика, то диагностированию необходимо уделять большое внимание.

При изготовлении, монтаже и пуске систем техническое диагностирование — неотъемлемая часть выполняемых работ. Основная цель диагностирования на этих этапах — проверка работоспособности; возможны два технических состояния системы: работоспособное (h_0) и неработоспособное. При ремонте с помощью диагностики можно выявить, содержит ли система дефектные элементы, действительно ли устранены все неисправности. Алгоритмы технического диагностирования должны обеспечивать требуемую достоверность результатов определения состояния системы.

При эксплуатации системы с помощью технического диагностирования определяют состояние функционирования (допустимое, предаварийное, аварийное), осуществляют поиск неисправности. Число состояний, различаемых в результате поиска неисправности, определяется глубиной поиска

дефекта и требуемой достоверностью результатов диагностирования. Глубина поиска задается указанием элементов системы, с точностью, до которых определяют место неисправности. Достоверность результатов диагностирования — степень соответствия состояния, оцененного по этим результатам, истинному состоянию системы. Количественно достоверность характеризуется вероятностью совпадения оцененного и истинного состояний.

Результаты диагноза используют при прогнозе развития событий и поиске причин отказов, аварий и т. п. В первом случае предсказывают (прогнозируют) состояние системы, в котором она может оказаться в некоторый будущий момент времени. Например, реактор в настоящий момент находится в предаварийном состоянии; определяются его возможные переходы в другие состояния, и в первую очередь в аварийные. Во втором случае восстанавливают состояние, в котором система находилась в некоторый предшествующий момент времени. Это особенно важно при расследовании аварий, выявлении причин их возникновения. Определение состояний, предшествующих аварии, а следовательно, и первопричины ее возникновения, исключительно важно для недопущения подобных аварий в будущем и на аналогичных системах.

Классификация методов технического диагностирования при эксплуатации системы и в нерабочем состоянии показана на рис. 9.1.

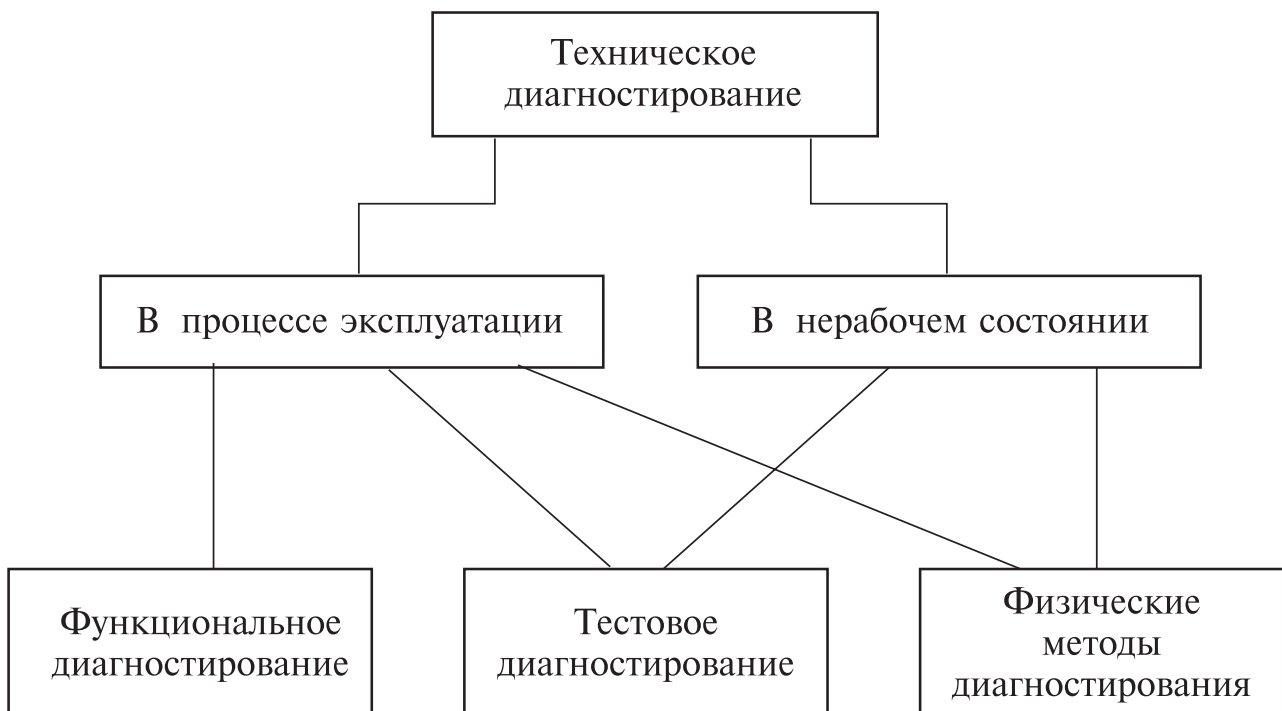


Рис. 9.1. Методы технического диагностирования

При эксплуатации технических систем наиболее распространено функциональное и тестовое диагностирование (рис. 9.2).

В первом случае состояние системы определяют по результатам текущего контроля за входными x и выходными y переменными. Во втором случае на систему подают специальные тестовые воздействия x_m .

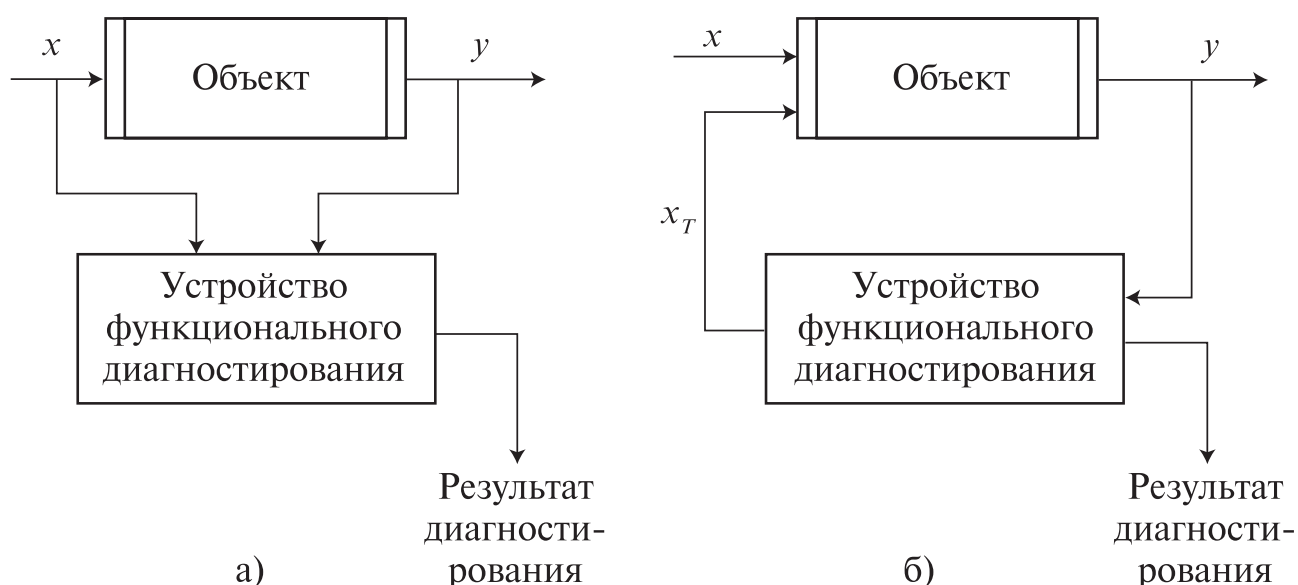


Рис. 9.2. Структурные схемы диагностирования:
а — функционального; б — тестового

Для технологического оборудования производств используют в основном функциональное диагностирование, для автоматических устройств контроля, управления и защиты применяют оба вида диагностирования, вычислительные средства, программное обеспечение проверяют с помощью тестов. При тестовом контроле на вход проверяемого устройства подаются специально подобранные совокупности входных воздействий (проверяющие тесты). Полученную на выходе реакцию сравнивают с эталонной. Если они совпадают, то устройство на момент контроля находится в работоспособном состоянии. В противном случае устройство неисправно, и подаются диагностические тесты для установления места, причины и вида неисправности. Разработаны специальные методы построения оптимальных тестов, позволяющих за минимальное время проверять работоспособность устройства в целом, а также алгоритмы автоматического решения задач синтеза проверяющих и диагностических тестов. Тесты разрабатывают одновременно с проектированием объекта.

Роль технической диагностики возрастает с увеличением мощности и сложности систем, для которых интуитивные методы и ручные способы определения состояний непригодны. Задачи диагностики сложных систем решают с использованием ЭВМ в рамках автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) или автоматизированных систем диагностики (АСД). Например, применительно к химико-технологическому комплексу АСД выполняет следующие функции:

- определение текущего состояния работоспособности, обнаружение предаварийных и аварийных состояний;
- локализация неисправностей до уровня отдельных аппаратов, элементов систем контроля, управления и защиты;
- регистрация моментов обнаружения неисправностей и их устранения;

- прогнозирование значений переменных химико-технологических процессов в различных состояниях работоспособности;
- прогнозирование предельного значения времени восстановления работоспособности системы;
- регистрация фактического времени восстановления работоспособного состояния;
- отображение оперативной информации о неисправностях на экране дисплея оператора;
- запись, накопление и хранение на магнитных дисках информации о неисправностях;
- выдача накопленной информации о неисправностях системы.

АСД, с помощью которой решают данные задачи, может быть реализована, например, на ЭВМ. На основе АСД строится автоматизированная система обеспечения безаварийности. Схема АСД приведена на рис. 9.3. Данная система осуществляет текущий контроль входных x , выходных y , переменных и параметров A объекта химической технологии.

После преобразования сигналов от датчиков в унифицированную форму (блок 2) значения $\hat{x}(t)$, $\hat{y}(t)$, $\hat{A}(t)$ сопоставляют с допустимыми для нормальной работы (блок 4), т.е. проверяют выполнение условий $\hat{x}(t) \in X_{don}$, $\hat{y}(t) \in Y_{don}$, $\hat{A}(t) \in A_{don}$, где X_{don} , Y_{don} , A_{don} — области допустимых значений соответственно x , y , A . Если какое-либо условие не выполняется, то в блоке 5 принимается решение о выдаче сигнала тревоги $S(x, y, A)$, а также выработке корректирующих воздействий управляющими устройствами (блок 11). В блоке 10 по данным о $\hat{x}(t)$, $\hat{y}(t)$, а иногда и отдельных значений $\hat{h}(t)$, оценивают вектор фазовых координат $z(t)$ и переменную состояния функционирования $h(t)$. Значения $\hat{z}(t)$ и $\hat{h}(t)$ сопоставляют с допустимыми (блок 9), т.е. проверяют условия $\hat{z}(t) \in Z_{don}$, $\hat{h}(t) \in H_{\partial}$. В блоке 5 анализируется текущее состояние системы в случае опасности и выдается сигнал предупреждения $S_n(z, h)$ или тревоги, $S(z, h)$ блоком 3. Блоком 7 производится диагностика имеющихся нарушений, а блоком 6 — проверка работоспособности системы обеспечения безаварийности с помощью специальных тестов.

Важное место в АСД занимают приборы для контроля физико-химических параметров веществ, прежде всего газоанализаторы, анализаторы жидкостей и создаваемые на их основе сигнализаторы.

Например, сигнализатор наличия горючих газов в воздухе калибруют на один из газов (метан, циклогексан, пропан, этиловый спирт, дивинил, метиловый спирт, бензол, этилацетат, пропилен, стирол и др.). Он автоматически включается при наличии в воздухе 20 % газов от нижнего предела взрывоопасной концентрации. В газоанализаторе — сигнализаторе взрывоопасных концентраций типа СВК сигнализация включается при наличии в воздухе 10, 20, 40 и 60 % газов от нижнего предела взрываемости.

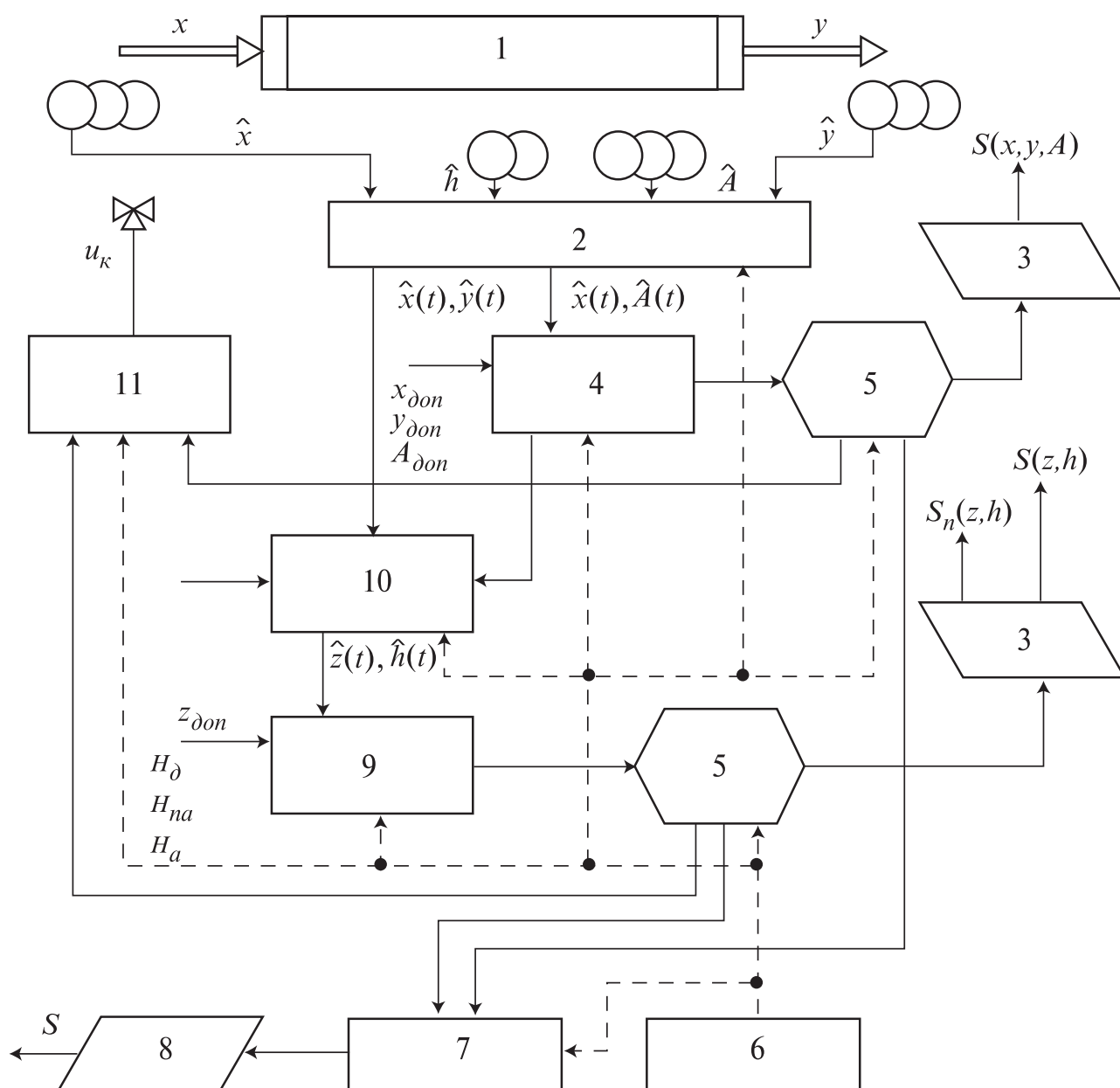


Рис. 9.3. Схема автоматизированной системы диагностики:

1 — объект; 2 — первичные преобразующие и обрабатывающие устройства; 3 — сигнал тревоги; 4 — сопоставление с интервалами, допустимыми для нормальной работы; 5 — анализ и принятие решения; 6 — проверка работоспособности системы; 7 — диагностика нарушения; 8 — сигнал о нарушении; 9 — сопоставление с интервалом Z_{don} и подмножествами состояний H_δ , H_{na} , H_a ; 10 — оценка переменных состояния z , h ; 11 — коррекция управляющих воздействий

Широко применяют на химических предприятиях физические методы неразрушающего контроля технического состояния различных машин и аппаратов: контроль вибраций и акустического шума, тепловой, оптический, радиационный, ультразвуковой, магнитографический, рентгенографический и другие методы.

Анализ вибрации машин и аппаратов позволяет получить важную информацию о процессах в различных механических устройствах, связанных

с вращением, качением, скольжением, движением жидкостей, газов, сыпучих материалов и т. д. В настоящее время разработаны датчики вибраций, методы и устройства получения частотного спектра — виброграмм. Схема системы контроля вибраций приведена на рис. 9.4, а. Расположение дискретных частот виброграммы и их амплитуды позволяют определять состояние работоспособности системы, обнаруживать зарождающиеся отказы, связанные, например, с износом. Характерный вид виброграмм для различных состояний функционирования показан на рис. 9.4, б.

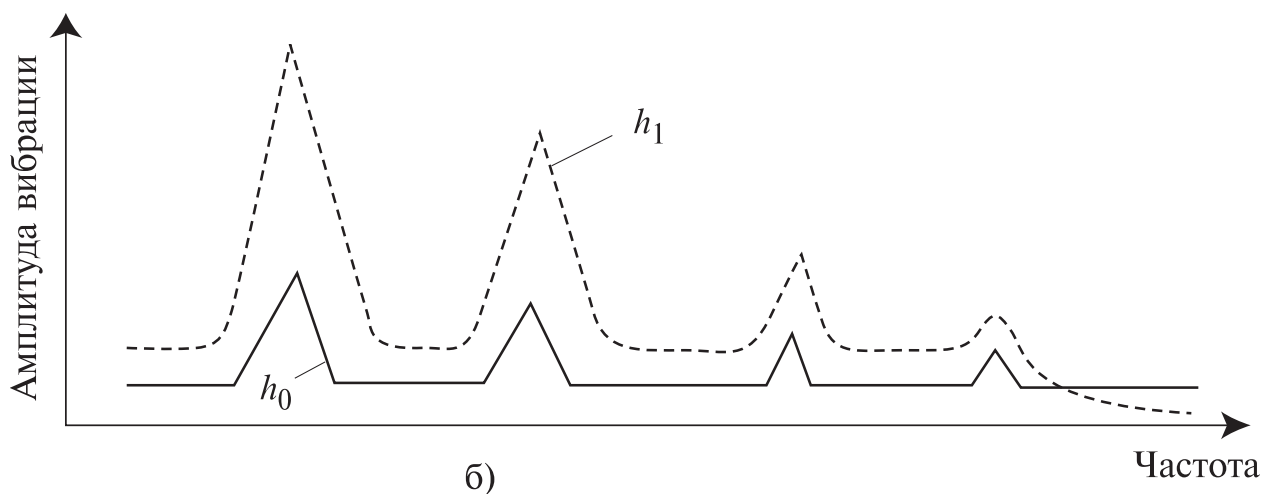
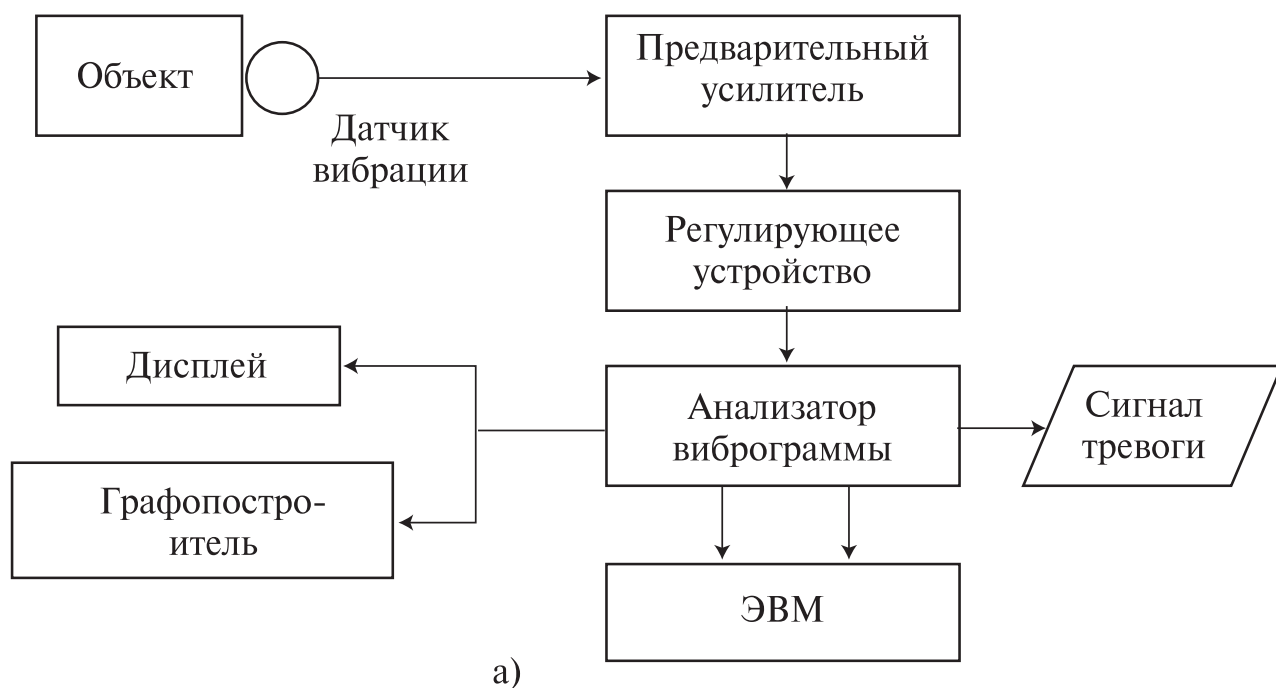


Рис. 9.4. Система контроля вибраций машин и аппаратов:
а — схема; б — виброграммы при различных состояниях работоспособности

Нарушения нормального функционирования, как правило, увеличивают вибрацию (см. пунктирную линию на рис. 3.4, б для состояния h_1).

Многим механическим узлам и устройствам технических систем на виброграмме соответствуют определенные дискретные частоты. Для вращательного механизма, например двигателя, компрессора, насоса, вентилятора,

турбины, имеется серия дискретных частот, кратных частоте вращения ротора. Разработан ряд критериев, позволяющих устанавливать допустимые уровни вибрации машин с механизмами вращения, в качестве параметров в критериях используются пики величины вибраций и смещения пиков. Основные источники вибрации в данном случае деформация или повреждение частей ротора, деформация корпуса и основания, эксцентриситет в подшипниках, повреждение подшипников и др. В меньшей степени исследованы виброграммы механизмов с возвратно-поступательным движением и коробок зубчатых передач.

Известны случаи проведения анализа вибраций стационарных аппаратов-теплообменников, дистилляционных и экстракционных колонн, абсорберов и др. Для оперативного диагностирования нарушений в системе изображение виброграммы выносится на экран дисплея системы контроля вибраций (см. рис. 9.4, а). Одновременно информационные параметры сопоставляют с допустимыми пределами; в угрожающих случаях подается сигнал тревоги.

Для диагностики и предотвращения нарушений в машинах и аппаратах широко используют измерение и анализ характеристик шумов, исходящих от движущихся механизмов, потоков — трубопроводов и теплообменников. С помощью акустических методов выявляют следующие повреждения: трещины в металлических корпусах аппаратов, стенках труб и соединениях, ослабление крепления, отложения на стенках и коррозию, течь в уплотнениях, пропуск газов и др.

Шумы аппаратов и машин характеризуют как общие свойства систем, так и свойства их частей. Производственный шум имеет широкий спектр сигнала, параметры его можно рассматривать как многомерный вектор. Опыт применения акустических методов показывает, что в состоянии нормального функционирования энергия шума в основном концентрируется в области низких частот, а энергия, соответствующая дефектам, располагается на более высоких частотах. Это обстоятельство используют для своевременного обнаружения зарождающихся нарушений.

Каждому состоянию работоспособности системы соответствует свой характерный спектр шума. Задача акустического диагностирования заключается в том, чтобы по зарегистрированному сигналу шума определить техническое состояние контролируемого объекта. Наиболее распространены два способа для решения этой задачи. Первый способ основан на применении взаимных корреляционных функций, он предполагает предварительную запись в память диагностического устройства временных реализаций сигналов, соответствующих различным состояниям работоспособности. В момент контроля записывается реализация шумового сигнала, излучаемого системой. Данную реализацию используют для расчета взаимных корреляционных функций с сигналами, хранящимися в памяти системы контроля. Считается, что система находится в состоянии, которому соответствует максимальная взаимная корреляция.

Второй способ основан на сравнении статистических характеристик реализаций сигналов, например плотностей распределений, автокорреляционных функций, энергетических спектров. В памяти хранятся статистические характеристики, типовые для возможных состояний функционирования. По реализации сигнала в момент контроля системы вычисляют текущую характеристику, которую сравнивают с типовыми. Рассчитываемые критерии близости (максимальное отклонение, среднее квадратическое отклонение и т. п.) используют для характеристики технического состояния системы.

Хорошие результаты получают с помощью метода акустической эмиссии. На поверхности системы устанавливают комплект датчиков, которые регистрируют упругие колебания акустического диапазона, источниками колебаний являются развивающиеся макро- и микродефекты материала-конструкции, а также движение дислокаций. По разности времени прихода импульсов акустической эмиссии к различным датчикам, суммарного числа импульсов, их интенсивности, характера амплитудного распределения сигналов определяют координаты расположения и степень опасности нарушения — источника акустической эмиссии. Спектральный анализ импульсов, корреляционные зависимости между сигналами от датчиков и размерами, конфигурацией и стадией развития макро- и микродефектов для конкретных марок стали позволяют оценить техническое состояние конструкции системы, ее остаточный ресурс.

Недостаток большинства акустических методов — необходимость иметь в памяти системы контроля реализации сигналов или статистические характеристики сигналов всех состояний функционирования. При этом они должны быть получены на контролируемой системе, чтобы учесть его индивидуальные особенности.

9.8. Алгоритм обеспечения эксплуатационной надежности технических систем

В процессе обработки информации по анализу последствий принимают решение либо о немедленном устранении конструктивных недостатков, изменении практики эксплуатации или технического обслуживания систем (если причина отказа очевидна), либо о проведении необходимых исследований для устранения причины отказа и последующего устранения слабого звена. Окончательные изменения в технологическую документацию вносят только после проверки принятых решений. Процесс этот носит непрерывный характер, что позволяет постоянно поддерживать и даже повышать необходимый уровень эксплуатационной надежности и безопасности оборудования. Таким образом, обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности представляет собой замкнутый цикл последовательных операций, один из возможных вариантов которого [10] изображен на рис. 9.5.

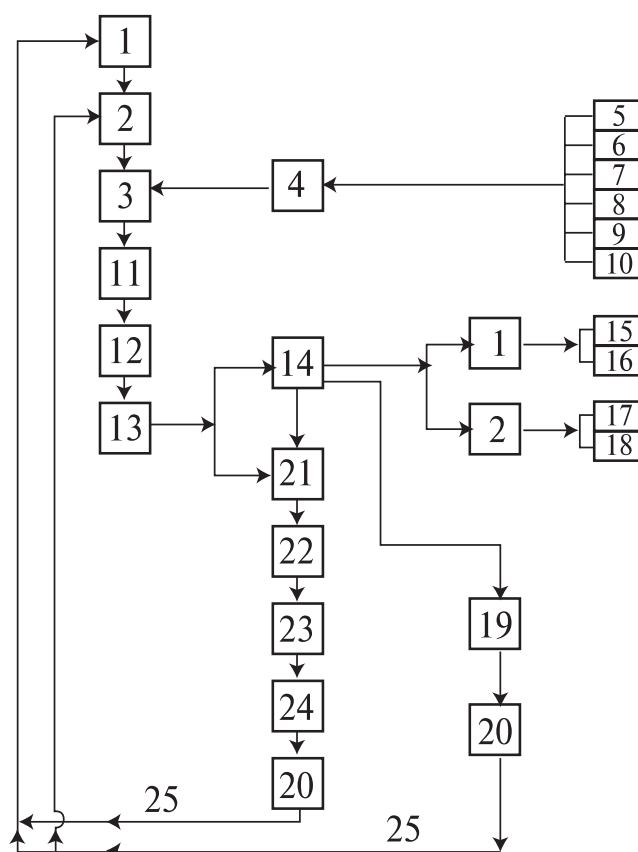


Рис. 9.5. Алгоритм обеспечения

эксплуатационной надежности и безопасности системы:

- 1 — конструкция оборудования; 2 — существующая практика эксплуатации;
 3 — информация; 4 — средства получения информации; 5 — причины отказов;
 6, 7 — сведения соответственно о расходе запасных частей и частоте их замены
 и о потерях производства, вызванных простоями; 8 — данные результатов инспекций
 оборудования; 9 — сведения об изменениях размеров, структуры и свойств материала
 деталей в процессе эксплуатации; 10 — другие сведения; 11 — обработка информа-
 ции; 12 — анализ причин отказов и выявление слабых мест; 13 — принятие решения;
 14 — решение о немедленном изменении конструкции, практики эксплуатации
 или технического обслуживания и ремонта оборудования; 15, 16, 17, 18 — изменение
 соответственно конструкции, материала детали или способа ее упрочнения,
 практики эксплуатации, практики технического обслуживания и ремонта;
 19 — проверка предложений в промышленной эксплуатации; 20 — данные промышлен-
 ной эксплуатации после внесенных изменений; 21 — решение о проведении исследова-
 ний; 22 — разработка методики исследований; 23 — результаты исследований;
 24 — усовершенствование конструкции или практики эксплуатации оборудования
 на основании исследований; 25 — обратная связь

Г Л А В А 10

Технические системы безопасности

10.1. Назначение и принципы работы защитных систем

Учитывая мощности современных технических систем, технологических линий или отдельных агрегатов, сложность алгоритмов управления ими, трудно ожидать от обслуживающего персонала безошибочной ориентации в каждой возможной аварийной ситуации и правильных оперативных действий, направленных на ликвидацию нарушений хода технологического процесса и предупреждение появляющихся опасностей. В связи с этим в состав сложной и потенциально опасной технической системы, помимо подсистемы автоматического регулирования, обеспечивающей при нормальном режиме работы поддержание параметров в заданных пределах, обязательно входит система защиты и блокировки, призванная путем автоматического переключения и введения резервного оборудования, снижения мощности или останова агрегата предотвратить развитие аварии. Таким образом, защита применяется для предотвращения повреждения и выхода из строя системы при возникновении аварийных режимов ее работы путем автоматического отключения (защита на отключение) или подачи сигналов (защита на сигнал). Различают защиту, основанную на непосредственном контроле за режимами работы систем или их элементов, и защиту при косвенном контроле за режимом работы оборудования, например: по параметрам привода, в частности электродвигателей; по характеристикам вибрации системы и др. Защита тесно связана с контролем и сигнализацией, например при изменении контролируемого параметра сначала может быть сформирован предупреждающий сигнал, а затем срабатывает защита.

Если промышленная система спроектирована так, что она может выдерживать все нагрузки, возникающие в процессе обычных или предполагаемых экстремальных условий работы, то задачей системы контроля производственных процессов должно быть обеспечение безопасной работы установки в заданных пределах. Для этого можно использовать такие системы, как ручное управление, автоматический контроль, системы автоматиче-

ского выключения, предохранительные устройства, системы аварийной сигнализации.

Основная идея безопасности производственного процесса заключается в том, чтобы надежно обеспечивать безопасные условия его работы. На рис. 10.1 показано, как при помощи системы контроля переменные характеристики производственного процесса в случае нарушения нормального режима удерживаются в безопасных пределах.

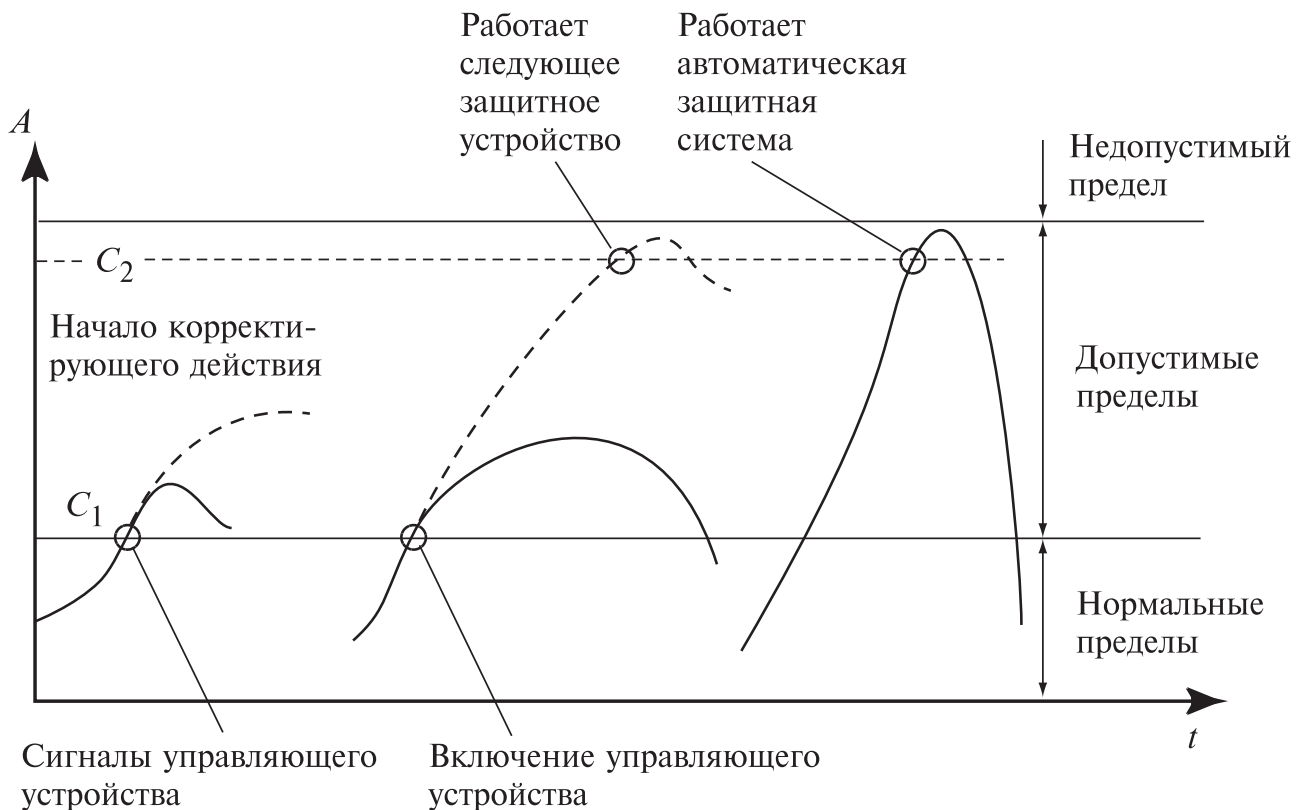


Рис. 10.1. Схема работы защитных устройств в системе тройного контроля:
 A — переменные характеристики процесса; t — время

Переменными в контролируемом процессе могут быть температура, давление, скорость потока, соотношение некоторых компонентов смеси, скорость повышения температуры, понижения или повышения давления. Системы тройного контроля или защиты действуют следующим образом.

Первая система. Как только переменные системы достигнут значения, превышающего установленный предел (C_1), это регистрируется специальным сигналом на устройстве управления, после чего производится коррекция (чаще всего оператором вручную). Если этого действия не производится и процесс при этом все же не создает опасных условий, включение следующей системы не происходит.

Вторая система. Когда переменная величина показателя процесса превышает предельное значение (C_2), автоматически включается система контроля, возвращающая эту переменную величину в диапазон ее нормальных значений. Если этого сделать не удастся, переменная величина показателя

процесса может достичь таких значений, которые могут вызвать аварийную ситуацию.

В этом случае появляется необходимость применения других предохранительных устройств, например разрывных мембран или предохранительных клапанов, действующих по принципу сброса давления, сливных емкостей и охлаждающих устройств.

Третья система. При отсутствии предохранительных устройств с упомянутыми характеристиками в случае, когда переменная величина показателя процесса достигает значений, при которых повышается вероятность крупной аварии, становится необходимым установка независимой защитной системы, автоматически включающейся при нарушениях процесса, чреватых аварией.

Примером такой системы является терморегуляционное устройство, регистрирующее превышение оптимальной температуры в процессе химических реакций. Как только достигается критическая температура, система включает дополнительное охлаждение процесса и добавляет в химическую смесь вещество, останавливающее реакцию.

Чтобы такая система работала надежно, следует постоянно следить за работой всех активных составных частей оборудования, т. е. насосов, компрессоров, вентиляторов, которые в нужный момент должны срабатывать так, чтобы можно было избежать аварии.

Для того чтобы работающий персонал мог полагаться не только на автоматические системы защиты, последние должны использоваться в сочетании с акустическими или световыми сигнальными устройствами. Более того, персонал должен быть хорошо обучен самостоятельно распознавать различные режимы работы оборудования, а также отдавать себе отчет в важности систем контроля.

Необходимо помнить о том, что любая система контроля может не всегда правильно срабатывать в фазах включения и выключения производственного процесса. Поэтому этим фазам следует уделять особое внимание.

10.2. Типовые структуры и принципы функционирования автоматических систем защиты

Представляется целесообразным рассмотреть типовые структуры автоматической системы защиты (АСЗ) на примере использования ее в химическом производстве. Выбор примера химической технологии не случаен — именно для них АСЗ достаточно детально разработаны.

В нормальном режиме функционирования систем технологическим процессом управляет автоматическая система регулирования (АСР). Для управления в предаварийном режиме используется автоматическая система защиты. АСЗ является составной частью системы управления (СУ) процессом и может использоваться в двух режимах:

- АСЗ непрерывно контролирует ход технологического процесса, но реагирует только на аварийные отключения регулируемого параметра;
- АСЗ подключается к процессу только в момент возникновения аварийной ситуации как резерв АСР.

Для АСЗ объектов химической технологии характерно то, что подавляющее большинство мер защиты сводится к разовым, но экстремальным по величине показателям воздействия на защищаемый объект (или процесс). При этом исходная информация о процессе чаще всего носит ярко выраженный позиционный характер.

Структурные схемы АСЗ могут быть трех видов в зависимости от алгоритма защиты, определяемого сложностью процесса и многообразием аварийных ситуаций, эффективностью, экономичностью, надежностью и т. д.:

- простейшие АСЗ;
- АСЗ с развитой логической частью;
- адаптивные АСЗ.

В простейшем случае АСЗ строится так, что повышение (или снижение) параметра, по которому ведется защита, до предельного значения вызывает управляющее исполнительное воздействие. Одноканальная АСЗ, настроенная, например, на повышение допустимого значения контролируемого параметра, реализует простой алгоритм защиты. Структурная схема простейшей АСЗ представлена на рис. 10.2.

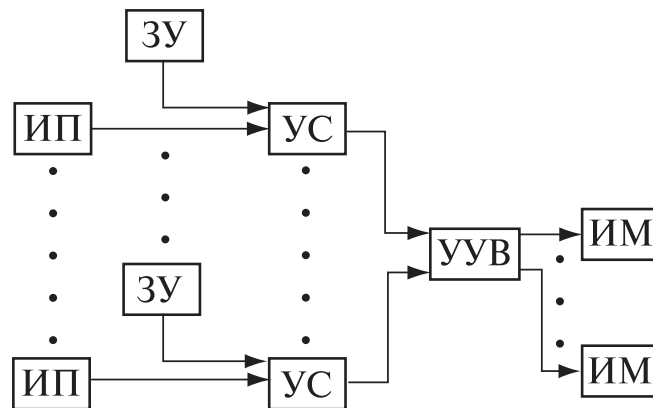


Рис. 10.2. Структурная схема простейшей АСЗ

Сигналы от измерительных преобразователей (ИП) поступают на анализаторы параметров процесса, представляющие собой устройства сравнения (УС). Одновременно с этим на анализаторы поступают допустимые значения параметров процесса от задающего устройства (ЗУ). Если какой-нибудь параметр оказался больше (или меньше) своего допустимого значения, то с соответствующего анализатора поступает сигнал в узел управляющих воздействий (УУВ), где происходит выбор управляющих (защитных) воздействий (УВ); сигналы с УУВ поступают к объекту управления через исполнительный механизм (ИМ). Исполнительных механизмов может быть несколько.

Таким образом, в анализаторах происходит сравнение текущих значений параметров с допускаемыми. Различные параметры могут вызывать одинаковые и разные управляющие воздействия. Узел управляющих воздействий в основном реализует логическую функцию «ИЛИ», например, при синтезе диметилдиоксана из изобутилена и формальдегида падение давления промышленной воды ниже определенного уровня вызывает нарушение температурного режима ректификационных колонн, дефлегматоры которых охлаждаются промышленной водой. Поэтому система защиты, изображенная на рис 10.2, после сравнения текущего значения давления воды с заданным в аварийном случае выдает сигнал на УУВ. В результате срабатывают три исполнительных устройства: прекращается подача изобутилена; прекращается подача формальдегида и отсекается подача пара на кипятильники колонн. Следовательно, АСЗ с простым алгоритмом защиты реализует задачу - остановить процесс при возникновении предаварийной ситуации.

Структурная схема АСЗ второго типа, реализующая сложный алгоритм, представлена на рис. 10.3.

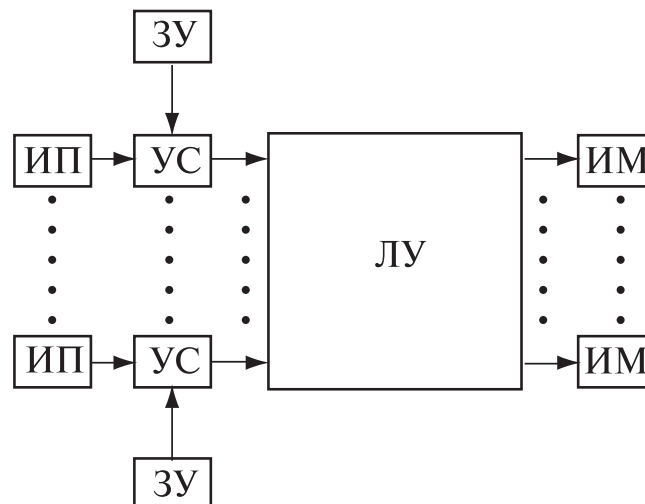


Рис. 10.3. Структурная схема АСЗ, реализующей сложный алгоритм защиты

В функции логического устройства (ЛУ) входит приведение в действие исполнительных устройств по определенному алгоритму; ЛУ может реализовать различные функции — «ИЛИ», «НЕ», «И», «ЗАПРЕТ» и т. д. В общем случае логическое устройство должно реализовать функции вида:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n); \\
 y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n); \\
 y_m &= f_m(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n),
 \end{aligned}$$

где: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ — состояния системы измерительных преобразований, принимающие после прохождения устройств сравнения значения 0 или 1;

$y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ — состояние системы исполнительных механизмов, которые также могут принимать значения 0 или 1.

Приведенные уравнения описывают алгоритм защиты потенциально опасного процесса от развития аварии. Таким образом, алгоритм защиты АСЗ второго типа задается в виде набора логических функций, каждая из которых вытекает из реальных связей, существующих в объекте защиты. Составление каждой логической функции опирается на результаты исследования процесса. Прежде чем реализовать этот алгоритм, функции надо минимизировать. Тем самым число логических элементов сократится до минимума и одновременно повысится надежность АСЗ. Наиболее характерное отличие АСЗ со сложным алгоритмом защиты — наличие двух ступеней защитных воздействий. Для примера рассмотрим АСЗ процесса нитрования глицерина. Эта система защиты прекращает подачу глицерина и кислотной смеси при следующих условиях:

- 1) скорость вращения мешалки в нитраторе снизилась более чем на 30 %;
- 2) расход кислоты превысил допустимое значение;
- 3) температура в реакторе достигла первого предела безопасности;
- 4) упало давление в линии подачи охлаждающего рассола ниже допустимого;
- 5) давление сжатого воздуха в линии питания АСЗ упало ниже допустимого;
- 6) нитратор переполнен.

Если, несмотря на принятые меры, процесс не вернулся в режим нормального функционирования и температура продолжает расти, то срабатывает II ступень защиты и содержимое нитратора автоматически сбрасывается в аварийную емкость, как только температура реакционной массы достигнет второго предела безопасности.

Следовательно, АСЗ с развитой логической частью, реализующая сложный алгоритм защиты, решает две задачи: возврат процесса в режим нормального функционирования и ликвидация процесса (в случае когда возврат уже неосуществим).

Предельное значение параметра, при котором срабатывают исполнительные механизмы АСЗ первых двух типов, выбирается наименьшим (или наибольшим) из условия обеспечения безопасности процесса. Эти условия обычно указываются только в регламентах и инструкциях, базируются на инструктивном представлении о характере задачи и существенно зависят от уровня технических знаний их составителей. Использование алгоритмов первых двух типов защиты неизбежно приводит к технологическим потерям за счет срабатываний АСЗ, когда процесс протекает нормально или когда еще можно вывести в нормальный режим работы другими средствами (например, временной приостановкой процесса).

Одной из задач создания адаптивной АСЗ является составление развитых алгоритмов, основывающихся не на интуитивном представлении о характере процесса, а на строгом математическом описании его. При этом математическое описание его должно включать как математическое описание самого химико-технологического процесса с учетом его кинетики, гидроди-

намической модели, теплового баланса в условиях аварийных ситуаций, так и описание процессов, происходящих в аппарате после исполнительного управляющего воздействия АСЗ того или иного типа. Система защиты, построенная на основе этого алгоритма, учитывает все особенности защищаемого процесса и за счет варьирования установки срабатывания позволяет избежать значительных потерь. Структурная адаптивной АСЗ показана на рис. 10.4.

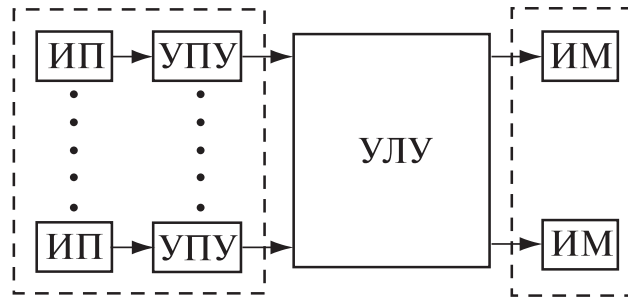


Рис. 10.4. Структурная схема адаптивной АСЗ

Структурная схема адаптивной АСЗ включает информационное устройство, состоящее из измерительных преобразователей (ИП) и усилительно-преобразующих устройств (УПУ), управляющее логическое устройство (УЛУ) и блок исполнительных механизмов (ИМ). Объем блока ИМ зависит от числа параметров, воздействующих на процесс при наличии аварийной ситуации. В функции УЛУ входят обработка информации от ИП по определенному алгоритму, результатом чего является оценка степени развития аварийной ситуации, выбор вида защитного воздействия, соответствующего данной степени развития аварийной ситуации и обеспечивающего безаварийность процесса, и выдача управляющего защитного воздействия на блок ИМ. УЛУ наряду с развитой логической частью включает в себя вычислительное устройство, в функции которого входит подготовка данных для определения необходимости ввода защитного воздействия с учетом экстраполяции изменения параметров защиты, характеризующих развитие аварийной ситуации, и последствий ввода защитных воздействий.

В развитие вышесказанного формируется общая задача оптимизации структуры АСЗ. В самом общем виде задачу выбора структуры и параметров АСЗ потенциально опасных процессов можно описать в виде подлежащего минимизации функционала:

$$\min S = \min \{S(\vec{m}) + M[\bar{N}(\vec{m})]\},$$

где: $\vec{m}$ — вектор параметров технических устройств АСЗ (например, точность и надежность входящих в АСЗ измерительных преобразователей, надежность и быстродействие логических устройств и исполнительных механизмов и т. п.);

- $S(\vec{m})$ — приведенные к общим единицам измерения затраты на построение системы и ее эксплуатацию как функция от векторов параметров;
- M — область допустимых решений вектора $\vec{m}$.
- $\bar{N}$ — усредненная по множеству M функция от несовершенства параметров технических устройств АСЗ, обозначаемых вектором $\vec{m}$;

Для случая построения АСЗ для потенциально опасных процессов ограничение области допустимых решений необходимо сформулировать прежде всего как обеспечение требуемой безаварийности:

$$\Phi(\vec{m})=c,$$

- где: $\Phi(\vec{m})$ — функция критерия безаварийности от параметров технических устройств АСЗ;
- c — требуемое значение критерия безаварийности.

10.3. Автоматическая интеллектуализированная система защиты объекта и управления уровнем безопасности

В качестве системы защиты объекта и управления уровнем безопасности производства (объекта) может быть использована **автоматическая интеллектуализированная система**. Интеллектуализированная техника содержит в своем составе процессоры с соответствующим программным обеспечением. Эти средства и системы построены по многоуровневому функциональному принципу и увязаны в единый иерархический обоснованный комплекс управления безопасностью объекта (например, химического производства). Задачи, которые возлагаются на интеллектуализированные системы, следующие: **Первая задача** связана с обеспечением нормального функционирования. Режим нормального функционирования процесса характеризуется соответствием (в допустимых пределах) режимных параметров заданным значениям, которые определяются обычно условиями оптимального ведения процесса.

Вторая задача обусловлена необходимостью локализации аварийных ситуаций, связанных с нарушением технологического процесса. **Третья задача** — локализация аварийной загазованности помещений по параметрам пожаро-, взрыво- или токсобезопасности за счет интенсификации вентиляции или прекращения поступления вредных (горючих) веществ в виде газов (паров) в окружающую атмосферу.

Очевидно, что за каждой из поставленных задач закрепляется и некоторое системное обеспечение. **Первую задачу** решает система управления, **вторую** — система противоаварийной автоматической защиты и **третью** — система газового анализа. Каждая из систем должна иметь свое программно-методическое обеспечение, алгоритмы контроля и управления самым

принципиальным вопросом является степень агрегатирования технических средств. Здесь можно сформулировать две крайние концепции: максимальная централизация (синтез) или полная дезагрегатизация (декомпозиция). Максимальная централизация предусматривает единый процессор для решения всех поставленных задач и максимальное совмещение средств контроля и управления. Это означает, что информация, поступающая с преобразователей, размещенных на объекте контроля, обрабатывается в центральном процессоре по единому алгоритму, имеющему блок аварийной остановки, который и выполняет функции системы противоаварийной защиты. Информация с канала контроля загазованности также обрабатывается в центральном процессоре, который запускает по сформулированным принципам блок аварийной остановки вентиляции. Структура интеллектуализированной системы, построенная по описанному принципу, приведена на рис. 10.5. Достоинством такой организации является высокий коэффициент использования процессора, который централизованно решает практически все интеллектуальные задачи, возникающие в процессе управлении производством. Вместе с тем, централизованная схема имеет принципиальный недостаток: канал противоаварийной защиты оказывается практически равнонадежным со системой управления. На практике это означает, что системой противоаварийной защиты будут «пропускаться» 50 аварийных ситуаций из 100. Значительно уменьшить количество «пропусков» можно только в том случае, если поднять надежность системы противоаварийной защиты (ПАЗ) на порядок по отношению к системе управления (СУ).

Исходя из этих соображений, предпочтительней может оказаться структура, представленная на рис. 10.6. Система построена в соответствии с деревом задач и практически полностью независима, т. к. имеет собственные, не связанные с СУ, каналы информации состояния объекта, полную функциональную независимость, вплоть до автономного питания. Очевидно, что любой потенциально опасный процесс имеет один или совокупность нескольких признаков, появление которых является предвестником возможных аварий. Эти признаки и являются информационными входами в системы ПАЗ. Для повышения надежности системы ПАЗ желательно, чтобы одна и та же информация об аварийных признаках поступала в систему по нескольким информационным каналам.

Надежность системы ПАЗ увеличивает также и то, что она контролирует состояние небольшого количества параметров по независимым от системы управления каналам и обрабатывает информацию по более простому алгоритму. При появлении информации, которая специальным логическим устройством расшифровывается как предварительная, система вырабатывает управляющее воздействие; оно должно вывести процесс из предварительного состояния и по определенной программе произвести аварийный останов. Система ПАЗ управляет при этом штатными ИМ или специальной быстродействующей аварийной ИМ. Бесконфликтность с СУ обеспечива-



Рис. 10.5. Централизованная организация технического интеллекта химического производства

ется блокировкой ее со стороны выхода системы ПАЗ на период проведения операции, остановка которых может привести к взрывам. По окончании такой операции блокировка снимается.

10.4. Типовые локальные технические системы и средства безопасности

Отказ любой промышленной установки, входящей в систему, может привести к отказу всей системы и к аварии. Ниже кратко описываются варианты типовых локальных систем и средств безопасности для отдельных узлов, агрегатов, установок и т. п. и их назначение.

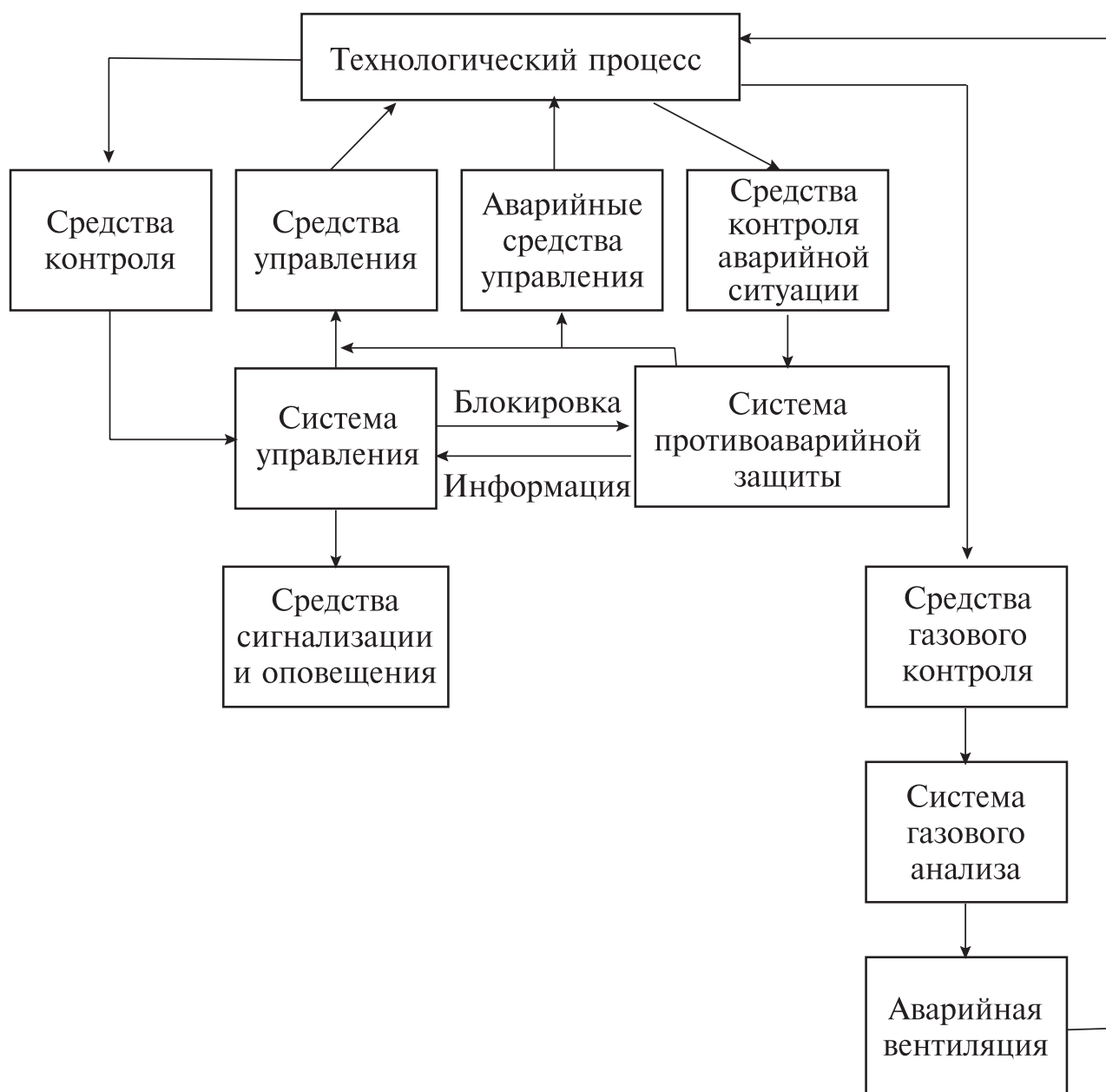


Рис. 10.6. Вариант децентрализованной организации системы обеспечения химического производства

10.4.1. Системы предотвращения отклонений от допустимых рабочих режимов

Системы сброса давления. Разрывные мембраны и клапаны безопасности обеспечивают аварийный выпуск вещества из реакционного сосуда в атмосферу. Если выброшенное вещество образует взрывоопасную смесь с воздухом, необходимо не допустить его контакта с возможными источниками огня до того, как будет достигнут нижний концентрационный предел взрывоопасности. Если произошел выброс токсичного вещества, оно должно быть отведено во вспомогательную систему, например в нагнетательные адсорберы, скрубберы или установки каталитического дожигания.

Датчики температуры и давления потока предназначены для автоматического аварийного включения систем аварийного охлаждения, остановки реакции или перепускной системы.

Системы, препятствующие переполнению. Устройства контроля уровня веществ предотвращают переполнение сосудов; они автоматически прекращают подачу потока вещества и обеспечивают его отвод.

Системы аварийного выключения оборудования. Это системы, отключающие производственное оборудование (например, насосы и компрессоры), открывающие или закрывающие быстродействующие клапаны с тем, чтобы обеспечить безопасность и целостность систем и всего предприятия. Эти системы могут приводиться в действие как вручную, так и автоматически.

10.4.2. Системы, предотвращающие разрушение деталей и узлов систем безопасности

Элементы и узлы систем безопасности должны быть оборудованы устройствами, обеспечивающими надежность их работы в зависимости от важности их функций. В промышленных установках могут действовать различные системы, дублирующие функции этих узлов, или могут использоваться аналогичные дополнительные системы, например второй охлаждающий насос.

10.4.3. Системы энергоснабжения

Системам снабжения, таким как электроснабжения систем контроля, подачи сжатого воздуха в аппаратуру или подачи азота в качестве инертного газа, может потребоваться второй источник питания, например аккумуляторные батареи, буферная емкость или дополнительный комплект баллонов для сжатого воздуха в случае неисправности основных источников.

10.4.4. Системы аварийной сигнализации

Эти системы (в которых используются сенсорные датчики) позволяют оператору определить причину неисправности при ее обнаружении.

Такие системы используются для:

- а) управления параметрами процесса (например, температурой, давлением, скоростью потока, его количеством, уровнем, соотношением веществ в смеси, содержанием кислорода);
- б) обнаружения неисправностей в узлах системы (насосах, смесителях, компрессорах, вентиляторах и др.);
- в) обнаружения утечек (газовые детекторы, эксплозиметры);
- г) обнаружения открытого огня или дыма;
- д) обнаружения повреждения защитных устройств.

10.4.5. Защитная автоматика

В зависимости от типа и назначения систем используются механические, термические, электромагнитные средства (защита, основанная на непосредственном контроле) и различные реле (защита, основанная на косвенном контроле). Распространенным видом защиты является релейная, которая в основном предназначена для защиты электрооборудования. При срабатывании защиты поврежденный элемент или система автоматически отключается (защита на отключение) или появляется световой (звуковой) сигнал (защита на сигнал). Применяется также защита в виде прекращения подачи электроэнергии или сжатого воздуха к объекту.

Разработка систем защитной автоматики основана на использовании ряда разделов теории управления и регулирования: теории информации и массового обслуживания (в системах автоматического контроля и сигнализации); теоретических основ электротехники (в системах защиты энергосистем и электрических цепей); синтеза релейно-контактных схем (в системах релейной защиты и блокировки). Развитие этих систем связано в настоящее время с использованием микропроцессорной техники.

10.4.6. Технические средства защиты

Работу систем безопасности на предприятии должны обеспечивать технические средства, за счет которых можно ослабить последствия несчастных случаев. К ним относятся:

- а) газовые детекторы;
- б) системы распыления воды (для охлаждения цистерн или для тушения пожара);
- в) струйно-водяные установки;
- г) системы для распыления пара;
- д) коллекторные сборники.

10.4.7. Способы предотвращения человеческих и организационных ошибок

Человеческие ошибки могут стать причиной крупных аварий. Поэтому их предотвращение должно расцениваться как один из важнейших аспектов обеспечения безопасности. В этой связи можно, например, на химическом предприятии предпринимать следующие меры;

- а) применять загрузочные шланги с разными соединительными штуцерами на установках по загрузке автомобилей-цистерн для предотвращения смешивания реактивных веществ (например, серной и азотной кислот);
- б) исключить возможность путаницы при определении места соединения монтажных проводов путем надлежащей маркировки и соответствующих разъемов;
- в) обеспечить блокировку предохранительных клапанов и выключателей, которые не должны работать одновременно;

- г) вести четкую маркировку переключателей, кнопок и панелей управления;
- д) организовать надежную систему коммуникаций для работающего персонала;
- в) использовать предохранительные устройства, исключающие случайные переключения;
- ж) проводить обучение работающего персонала.

Г Л А В А 1 1

Правовые аспекты анализа риска и управления промышленной безопасностью

Усложнение технологий, использование широкой номенклатуры химических веществ привело к тому, что происходящие техногенные аварии стали носить все более катастрофический характер, оказывая пагубное воздействие на здоровье людей и окружающую природную среду. Впервые серьезное внимание мирового сообщества к крупным промышленным авариям было привлечено после двух катастроф в середине 70-х годов.

1 июня 1974 г. в Великобритании (г. Фликсборо) на предприятии, производящем циклогексан, произошел взрыв, в результате которого 28 человек погибли, 89 получили травмы. Предприятию был нанесен значительный материальный ущерб. Спустя два года (10 июля 1976 г.), в итальянском городе Севезо, на химическом предприятии, произошел выброс в атмосферу диоксида, имевший серьезные последствия для здоровья людей, окружающей среды и приведший к эвакуации нескольких тысяч человек. Основная причина таких тяжелых последствий — неподготовленность персонала к действию во время аварий.

Европейское сообщество отреагировало на эти аварии принятием так называемой «Директивы по Севезо» (Директива Европейского Сообщества от 24 июня 1982 № 82.501.ЕЕС по предотвращению крупных промышленных аварий), которая обязала руководителей опасных производств проводить оценку опасности или риска, принимать меры по подготовке к возможным авариям и предоставлять информацию об опасностях.

Спустя два года после принятия «Директивы по Севезо» (19 ноября 1984 г.) произошла крупная авария в г. Мехико (пригород г. Мехико Сан-Хуан-Иксуатепек) — взрыв хранилища сжиженного нефтяного газа, в результате чего около 650 человек погибли, несколько тысяч получили травмы, а около 200 тыс. остались без крова или были эвакуированы. Выброс метилизоцианата на химическом предприятии в г. Бхопале (Индия) в том же году (3 декабря 1984 г.) привел к распространению ядовитого газового облака, из-за этого более 2000 чел. погибли (число погибших точно

не было установлено, по разным оценкам, цифра колеблется в пределах от 2 до 10 тыс. человек), более 200 тыс. были травмированы.

В этих случаях также сказалось практическое отсутствие соответствующих политики, законодательства и механизмов управления безопасностью на промышленных объектах. При расследовании аварий выяснилось, что предприятия и соответствующие государственные органы не имели конкретных планов действий на случай аварии, отсутствовала необходимая информация об используемых химических веществах и технологиях, не были вовремя приняты меры по предотвращению этих аварий. Откликом на эти события стали поправки в Директиве по Севезо для европейских стран. В Великобритании в 1985 г. была разработана и принята основная часть законодательства по предупреждению крупных аварий, именуемая Системой нормативных актов — SIMAN — английская версия Директивы Севезо. Конгрессом США в 1986 г. был принят закон «О чрезвычайном планировании и праве населения на информацию» (поправки к Закону о Суперфонде) и некоторые другие документы.

Поскольку уровень и характер законодательства всегда отражают степень подготовленности общества к решению тех или иных проблем, далеко не во всех странах в 70—80-е годы начало формироваться законодательство по промышленной безопасности, оно было в то время достаточно редким явлением. В 90-е годы международные организации продолжали активную деятельность по урегулированию вопросов предупреждения промышленных аварий. Принятые в последующие годы Конвенция МОТ по предотвращению крупных промышленных аварий и Конвенция ООН о трансграничном воздействии промышленных аварий обязывают страны, подписавшие их, разработать политику в области обеспечения промышленной безопасности. Однако ратификация их возможна только при наличии соответствующего государственного правового регулирования в этих странах.

Крупные промышленные аварии 70—80-х годов, как уже отмечалось, заставили политиков и промышленников развитых стран пересмотреть свое отношение к вопросам промышленной безопасности. Возникла очевидная необходимость появления законов, регулирующих специфические вопросы промышленной безопасности, которые не нормируются ни трудовым, ни экологическим правом. В 80-е годы развивалось законодательство по промышленной безопасности не только в странах ЕЭС, но и в США, Канаде, Японии. Структура систем законодательства в большинстве случаев, в т. ч. и в России, представляет многоступенчатую пирамиду, в вершине которой располагается Основной закон страны (Конституция) или Головной Закон, имеющий либо объединяющие вопросы охраны труда, экологии, гигиены труда и промышленной безопасности. Ниже расположены законы по промышленной безопасности (не во всех странах), которые принимаются либо парламентом, либо региональными органами власти. На следующей ступени — межотраслевые нормативные документы, принимаемые правительством на основании законов. Следующая ступень — отраслевая норматив-

ная и нормативно-техническая документация, утвержденная соответствующими компетентными государственными органами. За ними следуют различные ведомственные инструкции, положения, правила и т. д.

Основные элементы правового регулирования промышленной безопасности, составляющие национальные системы регулирования национальной безопасности, сводятся к следующим требованиям.

11.1. Классификация промышленных объектов по степени опасности

Первое мероприятие в любой системе контроля за опасностями — разработка правительствами через компетентный орган соответствующих критериев, согласно которым должно определяться, какие объекты представляют наибольшую потенциальную угрозу для безопасности. В большинстве стран (США, ФРГ, Нидерландах, Норвегии, Великобритании, Франции) классификация промышленных объектов по опасности производится по наличию опасных веществ на объекте. Такой же подход предлагается в Директиве по Севезо и Конвенции о трансграничном воздействии промышленных аварий. В законодательных актах устанавливается перечень опасных веществ и их пороговых количеств, при превышении которых на промышленном объекте последствий относят к категории опасного. Однако в законодательной международной практике известны и другие подходы к идентификации. Например, законодательством Бельгии опасные промышленные объекты классифицируются по видам опасной деятельности (шахты и каменоломни; паровые машины; предприятия по производству взрывчатых веществ; ядерные реакторы и установки, использующие радиоактивные материалы; предприятия, производящие и использующие отравляющие вещества). В Греции используется иной классификационный признак — по видам опасности. Промышленные объекты классифицируются как опасные (возможность взрыва, пожара и т. п.), вредные для здоровья (дым, газы и т. п.), дискомфортные (шум, запах и т. д.).

11.2. Оценка опасности промышленного объекта

Необходимо определить:

- возможные сбои, неполадки и ошибки, которые могут привести к аварии, а также сценарии возможных аварий;
- необходимые превентивные технические и организационные меры, которые должен принять предприниматель во избежание аварии;
- возможные последствия аварий;
- меры, которые должны быть приняты при локализации аварии и ликвидации ее последствий.

Для оценки опасности могут использоваться различные методы, такие как предварительный анализ опасности, анализ дерева отказов и анализ последствий аварий, оценка риска. Какой бы метод ни применялся, цель оценки опасности — определение потенциальных причин отказа в работе или аварий на промышленном объекте. В большинстве стран критерий оценки опасности — качественные показатели. В Нидерландах используют количественный показатель степени риска.

11.3. Декларация безопасности опасного промышленного объекта

Это одна из форм предоставления информации, закреплённая законодательно в странах Европейского сообщества для опасных промышленных объектов. Основная цель декларирования безопасности — заставить предприятие (опасный промышленный объект) провести оценку опасностей и информировать об этих опасностях компетентные органы. Декларация должна включать:

- информацию об объекте и процессах на нём с целью определения характера и масштабов использования опасных веществ;
- перечень мер, направленных на безопасное функционирование объекта и на контроль за отклонениями от обычного режима работ;
- идентификацию типа возможной аварии, её вероятность и возможные последствия;
- инструкции на случай аварийной ситуации на объекте.

Декларация безопасности должна обновляться либо через определённые промежутки времени, установленные законодательством, либо в случаях внесения изменений на объекте, либо при получении новой информации об опасных веществах.

11.4. 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, обеспечивающее участие в нём 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 определённых случаях правительство компенсирует населению затраты на переселение из особо техногенно-опасных регионов.

11.5. Система лицензирования

Законодательствами многих стран предусматривается предоставление компетентным органам право ограничивать производство путем установления лицензионного порядка. В большинстве стран требования по лицензированию промышленной деятельности касаются промышленных объектов, отнесенных к категории опасных.

11.6. Экспертиза промышленной безопасности

Проведение экспертизы промышленной безопасности предусматривается на всех стадиях функционирования промышленных объектов, начиная со стадии проектирования. Декларации безопасности также могут стать объектом экспертизы. В практическом руководстве Международного бюро труда «О предупреждении крупных промышленных аварий» говорится о необходимости проведения экспертиз промышленных объектов. Они могут проводиться как в обязательном порядке в соответствии с действующим законодательством, так и по поручению специально уполномоченных органов, местных органов власти или общественности.

11.7. Информирование государственных органов и общественности об опасностях и авариях

По оценке западных специалистов, одно из наивысших достижений демократии — «право общественности на информацию о вредном воздействии» (Community Right-to-Know), внесенное в США в раздел 313 части 111 Закона о поправках к Суперфонду (1986 г.). Эта информация должна включать описание:

- установки — объекта потенциальной опасности;
- потенциально опасных видов деятельности, опасных используемых веществ и методов контроля за ними;
- способов оповещения о чрезвычайных ситуациях;
- действий населения, принимаемых в случае чрезвычайных ситуаций;
- известного воздействия на людей в результате происшедших ранее аналогичных аварий;
- мер, которые необходимо принимать в случае поражения в результате аварии.

Рекомендации по определению территории вокруг объекта, на которой население необходимо информировать о нем, могут дать эксперты, проводившие экспертизу опасности. Информация должна периодически повторяться и при необходимости дополняться, обновляться с учетом возможных процессов миграции населения. В странах, где введена процедура декла-

рования безопасности, указанная информация для опасных промышленных объектов предоставляется в составе декларации безопасности.

Местные власти и администрация должны проверять, насколько такая информация доходит до людей и полно ими понимается. При необходимости принимать меры, направленные на усовершенствование этой работы.

Во время чрезвычайных ситуаций администрация должна информировать население, проживающее вблизи опасного объекта, о развитии аварии, результатах расследования причин возникновения чрезвычайной ситуации и возможном ближайшем или долгосрочном воздействии последствий аварии на население и окружающую среду.

11.8. Ответственность производителей или предпринимателей за нарушения законодательства и нанесенный ущерб

Вопросы ответственности администрации предприятия регулируются во всем блоке законодательства, касающегося вопросов охраны окружающей среды, труда и обеспечения промышленной безопасности. Эти вопросы обычно рассматриваются в головных законодательных актах. В США — это закон «О профессиональной безопасности и здравоохранении», в России — это «Закон об охране окружающей среды», в Великобритании — закон «Об обеспечении охраны труда и здоровья», в Нидерландах и Норвегии — законы «Об охране окружающей предприятие природной среды» и т. д. Усиление ответственности предприятий, на которых производят, перевозят, обрабатывают или хранят опасные вещества, регулируется в поправках 1990 г. к Закону США «О чистом воздухе». Администрация промышленных объектов несет ответственность за проектирование и безопасную эксплуатацию установки, происшедшие аварии и сведение к минимуму их последствий. Ответственность за последствия аварий, по западному законодательству, наступает вне зависимости от вины.

11.9. Учет и расследование

При проведении оценки опасности и составлении декларации безопасности необходимо учитывать опыт всех происшедших аварий, анализировать причины их возникновения. Поэтому требование учета и расследования аварий — обязательный элемент законодательства по промышленной безопасности. Информацию об авариях администрация промышленного объекта обязана предоставлять в компетентные органы власти. Здесь следует отметить, что учету и расследованию причин мелких аварий придается большое значение, поскольку любая мелкая авария при определенном стечении обстоятельств может привести к катастрофическим последствиям.

В Европейском сообществе ведется банк данных по учету аварий. Члены ЕЭС обязаны предоставлять туда информацию о происшедших авариях. Такое требование тоже содержится и в национальных законодательных актах. Например, в Законе ФРГ «Об аварийных ситуациях» указано, что владелец установки обязан сообщить в компетентные органы об аварии, а также не позднее чем в недельный срок сообщить о причинах аварии и мерах, принятых для ее локализации и ликвидации ее последствий.

11.10. Участие органов местного самоуправления и общественности в процессах обеспечения промышленной безопасности

Большое внимание в законодательстве развитых стран уделяется участию местных органов власти и общественности в регулировании промышленной деятельности. Они могут повлиять на решение о размещении промышленного объекта, принимают участие в информировании граждан об опасных объектах и авариях, которые могут нанести ущерб населению, в подготовке к действиям во время аварий и чрезвычайных ситуаций. В США разработана такая система, которую в настоящее время пытаются адаптировать и в других странах, в частности в России. В ней детально разработан механизм участия местных органов и общественности в регулировании промышленной безопасности.

11.11. Государственный контроль и надзор за промышленной безопасностью

Любая система надзора и контроля объектов повышенной опасности должна строиться на государственном уровне, т.е. должен существовать специальный орган (или органы), ответственный за промышленную безопасность и охрану труда. В России, например, Госатомнадзор РФ — государственная организация, занимающаяся надзором за безопасной эксплуатацией объектов ядерной энергетики (АЭС, АСТ, АТЭЦ и др.), в США — это OSHA (Occupational Safety and Health Administration) и EPA (Environmental Protection Agency), во Франции — служба промышленной экологии и Бюро оценки риска и промышленного загрязнения, в Норвегии — Государственный орган по борьбе с загрязнениями и Директорат по предотвращению пожаров и взрывов.

Госатомнадзор РФ организует и осуществляет государственное регулирование и надзор за безопасностью при производстве, обращении и использовании в мирных и оборонных целях атомной энергии, ядерных материалов, радиоактивных веществ и изделий на их основе с целью обеспечения

безопасности персонала ядерно- и (или) радиационно-опасных объектов и населения, защиты окружающей среды и интересов безопасности РФ.

Госатомнадзор РФ в пределах своей компетенции принимает решения, обязательные для органов государственного управления и предприятий, расположенных на территории РФ, независимо от их подчиненности и форм собственности, а также должностных лиц и граждан.

Конкретные задачи, функции и права Госатомнадзора РФ предусмотрены Положением о нем. В частности, Госатомнадзор РФ имеет право запрещать применение изделий и технологий, не обеспечивающих ядерную и радиационную безопасность персонала, населения и окружающей среды, привлекать к административной ответственности должностных лиц министерств и ведомств, органов исполнительной власти, предприятий, виновных в нарушении требований, правил, норм ядерной и радиационной безопасности.

Основной задачей Госэнергонадзора в РФ является осуществление контроля за техническим состоянием и безопасным обслуживанием электрических и теплоиспользующих установок потребителей электрической и тепловой энергии, рациональным и эффективным использованием электрической и тепловой энергии на предприятиях, в организациях и учреждениях независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности.

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. Надзор осуществляется в угольной, горнорудной, горнохимической, нерудной, нефтедобывающей и газодобывающей, химической, металлургической и нефтеперерабатывающей промышленности, в геологоразведочных экспедициях и партиях, а также при устройстве и эксплуатации подъемных сооружений, котельных установок и сосудов, работающих под давлением, трубопроводов для пара и горячей воды, объектов, связанных с добычей, транспортировкой, хранением и использованием газа, при ведении взрывных работ в промышленности.

На Госгортехнадзор РФ возложены *следующие функции*:

- организация и осуществление государственного регулирования промышленной безопасности и государственного надзора за соблюдением центральными органами федеральной исполнительной власти, предприятиями, объединениями и организациями, независимо от их организационно-правовых форм, должностными лицами и гражданами требований по безопасному ведению работ в промышленности, устройству и безопасной эксплуатации оборудования;
- организация и осуществление государственного горного надзора в целях обеспечения соблюдения всеми пользователями недр законодательства РФ, утвержденных в установленном порядке;

- требований (правил и норм) по безопасному ведению работ, предупреждению и устранению их вредного влияния на население, окружающую природную среду, объекты народного хозяйства, а также по охране недр;
- разработка и осуществление совместно с центральными органами федеральной исполнительной власти, органами исполнительной власти республик в составе РФ, краев, областей, автономных образований, местными администрациями, а также с предприятиями, объединениями и организациями мер по профилактике аварий и производственного травматизма;
- установление требований (правил и норм) по безопасному ведению работ, изготовлению и безопасной эксплуатации оборудования, а также по охране недр и переработке минерального сырья;
- осуществление лицензирования отдельных видов деятельности, связанных с повышенной опасностью промышленных производств (объектов) и работ, а также обеспечением безопасности при пользовании недрами;
- участие в разработке и контроль за реализацией научно-технических программ по приоритетным направлениям обеспечения безопасности промышленных производств, персонала и населения;
- обобщение практики применения законодательства РФ в области безопасности ведения работ в промышленности, охраны и использования недр, применения взрывчатых материалов в народном хозяйстве и разработка предложений по его совершенствованию.

Госгортехнадзор РФ осуществляет государственное регулирование и надзор на территории РФ через образуемые им региональные органы (округа).

Госгортехнадзору РФ предоставлено право:

- проводить беспрепятственно проверки подконтрольных предприятий и объектов по вопросам, относящимся к его компетенции, а также привлекать по согласованию с центральными органами федеральной исполнительной власти, объединениями и предприятиями их специалистов для проведения указанных проверок, получать необходимые объяснения, справки и сведения по возникающим вопросам;
- вносить в центральные органы федеральной исполнительной власти предложения и давать руководителям предприятий, объединений, организаций и гражданам, а также подразделениям местных администраций, имеющих подконтрольные Госгортехнадзору РФ объекты, обязательные для исполнения указания (предписания) об устранении выявленных нарушений условий действия разрешений (лицензий), требований (правил и норм) по безопасному ведению работ, хранению и использованию взрывчатых материалов, а также по разработке, устройству, изготовлению и безопасной эксплуатации технологических процессов и оборудования, охране недр;

- утверждать нормативно-технические документы по вопросам, входящим в компетенцию Госгортехнадзора РФ, обязательные для исполнения всеми юридическими лицами и гражданами на территории РФ;
- давать обязательные для исполнения предписания о приостановлении работ, которые ведутся с нарушениями правил и норм безопасности и охраны недр, а также указания о выводе людей с рабочих мест, когда создается угроза их жизни или при возникновении аварии, а в случае необходимости — непосредственно приостанавливать работы и выводить людей, опечатывать места работ или оборудование;
- приостанавливать действие или аннулировать (изымать) выданные разрешения (лицензии) на право ведения разрешенной деятельности в случае нарушения условий действия разрешений (лицензий), а также в случаях, когда возникает опасность аварий, угроза гибели людей или нанесения ущерба их здоровью.

Органы Госгортехнадзора РФ *имеют также право:*

- проверять у должностных лиц и граждан наличие документов, дающих право на техническое руководство работами и на их выполнение, а также соблюдение специальных требований, установленных для приема на работу, связанную с повышенной опасностью;
- прекращать самовольное пользование недрами и самовольную застройку площадей залегания полезных ископаемых, а также ограничивать, приостанавливать или запрещать сброс в недра сточных вод, захоронение вредных веществ и отходов производства, подземное хранение веществ и материалов в случаях нарушения требований законодательства РФ о недрах;
- участвовать в установленном порядке в создании, реорганизации и ликвидации предприятий и организаций по оказанию технических, экспертных и других видов услуг по вопросам обеспечения безопасности производств и охраны недр;
- в пределах своей компетенции издавать постановления и давать указания, обязательные для исполнения центральными органами федеральной исполнительной власти, объединениями, предприятиями и гражданами.

Основная задача подобных органов — контролировать соблюдение требований действующего законодательства в области экологической и промышленной безопасности. На предприятиях должны находиться специально уполномоченные лица или органы, контролирующие соблюдение требований промышленной безопасности, что закрепляется законодательно. Например, в законах ФРГ «Об инженерах по технике безопасности» и Нидерландов — «Об охране окружающей предприятие среды».

11.12. Разработка планов по ликвидации аварий и локализации их последствий, а также планов по ликвидации чрезвычайных ситуаций

В странах, где законодательством регулируется предоставление Декларации безопасности, в которую входят планы по локализации аварий и ликвидации их последствий, требование о составлении таких планов в отдельных законодательных актах отсутствует. Однако в некоторых законах самостоятельно регулируются вопросы планирования, в частности в законе США «О планировании на случай чрезвычайных ситуаций и о праве общественности на информацию». Для планирования действий при ЧС создаются местные комитеты, которые разрабатывают планы действий. В этих планах определяются объекты, на которых используются опасные вещества, маршруты их перевозок, содержатся инструкции и меры по ликвидации последствий аварий на промышленной площадке и за ее пределами.

11.13. Экономические механизмы регулирования промышленной безопасности

В мировой практике широко применяются экономические механизмы регулирования промышленной безопасности. К ним относятся штрафы, квоты на загрязнение, налоговые и страховые механизмы, общественные и государственные фонды и т. д.

Вопрос экономического регулирования промышленной безопасности — предмет отдельной статьи. Однако отметим, что наиболее эффективный источник компенсации для запланированных экологических ущербов (плановые выбросы и сбросы предприятий) — экологические фонды, формирующиеся за счет штрафов, квот и т. д. В случае нестационарных (аварийных) ущербов наиболее эффективный источник — фонды страховых компаний, образующиеся из страховых сумм по страхованию ответственности (за ущерб, нанесенный деятельностью предприятия населению и окружающей среде). Страхование ответственности в развитых странах обязательно и закреплено соответствующими законодательными актами. Конкретные системы тарификации страховых сумм должны определяться страховыми компаниями совместно с компетентными органами.

Основная задача всех мероприятий по промышленной безопасности — предупреждение промышленных аварий и подготовка к действиям при их возникновении. К наиболее важным мероприятиям относятся введение критериев для выявления опасных промышленных объектов, проведение оценки опасности и составление для опасных промышленных объектов на базе этих оценок Декларации безопасности и введение лицензирования опасных видов промышленной деятельности.

11.14. Российское законодательство в области промышленной безопасности

В России в настоящее время объективные тенденции, связанные с увеличением техногенных опасностей, усугубляются общим экономическим кризисом, который привел к медленным темпам реконструкции производств, отставанием сроков ремонтов и замены устаревшего оборудования, неудовлетворительному состоянию систем предупреждения и ликвидации аварий, ухудшению уровня подготовки и снижению квалификации специалистов и персонала. Наблюдается устойчивая тенденция быстрого износа и старения основных фондов. В целом по России износ основных фондов составляет 40,6 %, а машин и оборудования — 57 %. Особенно тяжелое положение сложилось в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности. Амортизационный износ оборудования достигает 80—85 %, а в отдельных производствах 100 %. Допускаются грубые нарушения установленных требований по проведению ремонта оборудования, перенос сроков ремонта без надлежащих технических обоснований, необоснованная замена регламентных видов ремонта на упрощенные.

Оценка состояния технической безопасности ряда объектов угольной, горнометаллургической промышленности показала, что большая часть производств не соответствует надлежащему уровню безопасности.

Кроме того, предприниматели и руководители предприятий в сложных экономических условиях вынуждены сокращать расходы. При отсутствии правовых ограничений они делают это в первую очередь за счет расходов на безопасность.

Ухудшение положения в области промышленной безопасности также обусловлено слабым механизмом ответственности предприятия за нарушения требований безопасности. Нормы, содержащиеся в КЗОТ, административном и уголовном кодексах, явно недостаточны и ориентированы на административно-командную систему управления. Например, в них не предусмотрена ответственность опасных предприятий за нарушение требований лицензии, несвоевременное предоставление декларации безопасности, непредставление соответствующей информации и за многие другие нарушения.

Поскольку промышленная безопасность как самостоятельная область права появилась недавно, то и контроль в этой области российским законодательством почти не регулируется.

Однако, учитывая мировую практику в части правового обеспечения промышленной безопасности, в Российской Федерации введен принципиально новый подход в части обеспечения безопасности людей и защиты окружающей среды, основанный на процедуре декларирования безопасности промышленных объектов.

Для обоснования безопасности проекта особо опасного промышленного объекта или действующего особо опасного промышленного объекта, определения характера и масштабов опасности на нем, выработки организационных, технических и иных мероприятий по обеспечению промышленной безопасности и предупреждению аварий, регламентации действий персонала в аварийных условиях, предприятием обеспечивается подготовка декларации безопасности промышленного объекта.

За прошедшие годы были разработаны и применялись следующие документы, регламентирующие процедуру декларирования безопасности:

1. Положение о декларации безопасности промышленного объекта Российской Федерации (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 01.07.95 № 675).

2. Временное руководство по организации работы территориальных подсистем РСЧС в области предупреждения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (утверждено приказом министра Российской Федерации по делам чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий от 15.08.95 № 569).

3. Временное требование к идентификации объектов, связанных с повышенной опасностью (утверждены 14.09.95 министром РФ по делам чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий и председателем Федерального горного и промышленного надзора России).

Кроме того, стали учитываться действующее в смежных сферах регулирование вопросов обеспечения предупреждения чрезвычайных ситуаций и промышленной безопасности нормативные акты:

1. Указ Президента РФ от 19 августа 1993 г. № 1267 «Об особенностях приватизации и дополнительных мерах государственного регулирования деятельности предприятий оборонных отраслей промышленности».

2. Постановление Правительства РФ от 21 марта 1994 г. № 223 «О сертификации безопасности промышленных и опытно-экспериментальных объектов предприятий и организаций оборонных отраслей промышленности, использующих экологически вредные и взрывоопасные технологии».

3. Система сертификации безопасности взрывоопасных производств РОС РУ 001.01.ПВ 00.

Порядок разработки декларации безопасности промышленного объекта Российской Федерации был подготовлен с учетом замечаний заинтересованных министерств и ведомств (Госкомсанэпиднадзора России, Роскомнефтехимпрома, Минтопэнерго России, Роскомметаллургии, Госкомоборонпрома России, Госстроя России, Госстандарта России и др.) и утвержден приказом МЧС России и Госгортехнадзора России от 4 апреля 1996 г. № 222/59.

Рассмотренные п. 11.1—11.13 элементы регулирования промышленной безопасности в виде отдельных фрагментов также присутствуют в российских законах, относящихся к смежным отраслям права, таким как природо-

охранная, санитарная, законодательство об охране труда, а также в законах профилирующих и специальных отраслей права.

Важное значение для проведения оценки опасности и прогнозирования возникновения возможных аварий и их последствий имеет наличие систематизированной информации по учету и расследованию аварий. Предприятия обязаны давать информацию только по категорийным авариям в соответствии с Инструкцией по расследованию аварий. В Основах законодательства об охране труда впервые появилось требование об учете аварий. Правда, это касается аварий, повлекших за собой несчастные случаи. Статья 6 Федерального закона «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» предусматривает в обязательном порядке гласность и информацию в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций.

Наиболее полно в законодательстве РФ регулируется порядок размещения промышленных объектов — при выдаче разрешения на размещение предписывается учет возможных нарушений экологических и санитарных норм.

Правовые основы обязательной сертификации продукции и услуг с целью обеспечения контроля безопасности для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества установлены в Законе о сертификации. В частности, в законе указано, что обязательная сертификация осуществляется в случаях, предусмотренных законодательными актами РФ.

Достаточно ново для российского законодательства — введение разрешительной системы для регулирования возможности ведения тех или иных видов хозяйственной деятельности. Впервые такой элемент регулирования появился в Законе «О предприятиях и предпринимательской деятельности». В ст. 21 записано, что отдельные виды деятельности могут осуществляться предприятием только на основе лицензии. Перечень таких видов деятельности должен определяться либо уполномоченными органами, либо Правительством РФ. Следующим законом, которым вводится лицензирование, стал Закон «О недрах», однако в нем регулируются только вопросы лицензирования использования недр. Порядок лицензирования опасных видов промышленной деятельности не регулируется.

Проведение обязательной экспертизы включено в Закон «Об охране окружающей среды». Соответствующими статьями регулируется необходимость обязательного проведения экологической экспертизы, а в «Основах законодательства об охране труда» — экспертизы по охране труда.

Большое внимание в законодательстве любого демократического государства уделяется информированию и участию населения и органов местного самоуправления в вопросах управления экологической и промышленной безопасностью. Почти все законы, имеющие отношение к вопросам промышленной безопасности и принятые в России после 1991 г., включают статьи, обязывающие информировать государственные органы и общественность по вопросам, которые регулируются тем или иным законом.

Особое место в российском законодательстве занял принятый 20 июня 1997 года Государственной думой Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [68]. Таким образом, Россия ликвидировала пробел в этой отрасли права, отстав на 15 лет от стран Европейского сообщества (см.п.11.1).

Настоящий Федеральный Закон определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО) и направлен на предупреждение аварий и обеспечение готовности организаций, эксплуатирующих ОПО, к локализации и ликвидации последствий указанных аварий. Федеральный Закон позволит повысить уровень обеспечения безопасности проектируемых и действующих промышленных объектов, эффективно использовать новые, апробированные мировым сообществом методы регулирования промышленной безопасности, улучшить информирование властей, специально уполномоченных органов, населения и общественности об опасностях промышленных объектов, способствовать предотвращению крупных промышленных аварий.

Федеральный Закон предусматривает, определяет и устанавливает:

- лицензирование опасных видов деятельности в области промышленной безопасности;
- сертификацию технических устройств, применяемых на ОПО;
- требования промышленной безопасности к проектированию, строительству и приемке в эксплуатацию ОПО;
- требования промышленной безопасности к эксплуатации ОПО;
- требования промышленной безопасности по готовности к действиям по локализации и ликвидации последствий аварии на ОПО;
- производственный контроль за соблюдением требований промышленной безопасности;
- техническое расследование причин аварии;
- экспертизу промышленной безопасности;
- разработку декларации промышленной безопасности;
- обязательное страхование ответственности за причинение вреда при эксплуатации ОПО;
- федеральный надзор в области промышленной безопасности в целях проверки выполнения требований промышленной безопасности;
- ответственность лиц, виновных в нарушении законодательства в области промышленной безопасности.

Г Л А В А 12

Принципы оценки экономического ущерба от промышленных аварий

12.1. Понятие ущерба и вреда. Структура вреда

Вред — понятие социальное. В словаре русского языка он определяется как ущерб, порча. Ущербом, согласно словарю, называется убыток, потеря. Убытком же — ущерб, потеря; потеря — утрата, а утрата — потеря, ущерб, урон. В данном случае специально приводится столь разнообразная терминология, раскрывающая различные оттенки богатого русского языка. В этом одна из причин того, что в настоящее время не сложилось достаточно устойчивой терминологии относительно названия тех потерь, которые возникают при реализации опасностей различного характера. Вред имеет различный оттенок — экономический, экологический, моральный, социальный и т. д. Но несмотря на это все, в основе понятия «вред» лежат экономические факторы. Отсюда вред — понятие экономическое. Его составными частями служат понятия **ущерб** и **убыток**.

Применительно к природной среде причиненный вред может быть представлен в виде реальных и предполагаемых потерь для нее. Такие потери выражаются в форме **ущерба — реальные потери в природной среде (уничтожение лесных массивов, животного мира, истощение вод, снижение плодородия почв и т.п.) и убытков** — расходы на восстановление нарушенного состояния природной среды, неполученные доходы, экологические потери.

Вред природной среде включает количественные и качественные потери в окружающей нас естественной среде обитания. Они проявляются в загрязнении окружающей среды, т.е. физико-химическом изменении состава воздуха, воды, земель, создающем угрозу для здоровья населения, растительного и животного мира, в порче (приведении в негодность), повреждении, уничтожении природных объектов и экосистем. Измененное вследствие причиненного вреда качество природной среды, в свою очередь, отрицательно воздействует на социальную среду — наносится вред здоровью людей, материальным ценностям.

Таким образом, в общем понятии вреда природной среде различают вред первичного и вторичного происхождения. Вред здоровью и материальным ценностям носит производный характер, поскольку происходит от вторичного вреда, причиненного природной среде.

Вред здоровью проявляется в потерях физиологического, экономического, морального, генетического характера. Вред материальным ценностям направлен на ущемление имущественных интересов собственника — имущества. Это не только государство, но и кооперативные, общественные, частные предприятия и организации. Он может быть в виде потерь урожая сельскохозяйственных структур, гибели сельскохозяйственных животных, уничтожения многолетних насаждений, неполученных доходов.

12.2. Экономический и экологический вред

Подобное деление вытекает из самой системы взаимодействия общества и природы, где функционируют две подсистемы — экономическая и экологическая.

Вред *экономический* вытекает из экономической оценки природных ресурсов. Он посягает на экономические интересы природопользователя (собственника, владельца, пользователя, арендатора). Такой вред выражается в потерях запасов природных ресурсов (товарной древесины, рыбных запасов, полезных ископаемых и т. д.), материальных ценностей (урожая, сельскохозяйственных животных, многолетних насаждений и т. д.), неполучении дохода, который должен быть получен при нормальных условиях производства. Так, экономический вред, возникший при нарушении правил пожарной безопасности в лесах, включает: стоимость уничтоженной огнем товарной древесины, строений и сооружений, пострадавших при пожаре, затрат на тушение пожара и уборку территории, расходов по возмещению ущерба другим организациям и лицам. Однако не только этим измеряются потери, возникшие при пожаре. Перестал функционировать лесной массив, уничтоженный пожаром. Атмосферный воздух лишается естественного фильтра, очищающего окружающую среду от пыли и газов, а почвы и реки — от эрозии и обмеления. Отсюда возникает необходимость исчислять не только экономический, но и *экологический* вред. Он посягает на интересы человека в чистой, здоровой и благоприятной для жизни окружающей природной среде. Материальным объектом его посягательства служит **качество природной среды**: состояние его экологических систем, т. е. обменные процессы, которые протекают в биосфере. Он проявляется в различных биологических формах, связанных с количественными и качественными изменениями в биосфере под влиянием хозяйственной деятельности человека.

Экологический вред органически связан с экономическим. Оба они исходят из одного и того же источника причинения и имеют одни и те же способы проявления. Положим, загрязнение водоема не только ухудшает

качество вод, делая их экологически вредными, но и наносит ущерб товарным запасам рыб и другим видам, приводит в негодность пляжи, места отдыха и туризма и т. д. Как правило, причинение вреда экономического порождает вред экологический и наоборот.

Вместе с тем экологический вред нуждается в особом рассмотрении по следующим причинам. **Во-первых**, с точки зрения своего проявления он может быть растянут на более или менее длительные периоды как **во времени**, так и в **пространстве**. Поэтому методика расчета такого вреда при эколого-экономической или эколого-юридической ответственности исходит прежде всего из самого факта его причинения (например, превышение предельно допустимых концентраций вредных веществ, установленных для атмосферы или водоемов), а не из последствий его проявления, которые могут быть отдалены на несколько лет, вплоть до следующих поколений, и растянуты на значительное географическое пространство.

Во-вторых, в отличие от экономического вреда, который в принципе всегда восстановим (даже редкие архитектурные памятники восстанавливают по чертежам, а музеи — по воспоминаниям), экологический вред подразделяется с этой стороны на восполнимый, невосполнимый, относительно или трудно восполнимый. Названные особенности создают сложности при восстановлении потерь в природной среде, когда они возможны по объективным законам развития природы и при подсчете убытков. Оценить экологический вред в деньгах — это значит не только определить затраты на восстановление нарушенной природной среды, на воспроизводство природных ресурсов, но и вычислить те экологические потери, которые не восполнимы или трудно восполнимы средствами человеческого прогресса. В частности, в случае уничтожения лесного массива в расчет берутся:

- а) расходы по посадке и выращиванию леса до взрослого состояния;
- б) стоимость ущерба, который будет нанесен природной среде (почвам, рекам и озерам, животному миру) и здоровью человека (поглощение углекислоты, очистка от пыли, выработка кислорода);
- в) моральный ущерб в течение всего периода постепенного биологического созревания леса.

В отдельных странах предпринимаются попытки выработать методику подсчета такого вреда. Но пока она в официальном порядке не существует. Хотя с ее появлением для природы мало что изменилось к лучшему (ведь что сделано, то сделано и обратно ее не вернешь). Поэтому огромное значение на разных уровнях природоохранительной деятельности — техническом, экономическом, организационном и юридическом — решающую роль приобретает **превентивная работа**, предупреждающая наступление любого вреда и в первую очередь, конечно, необратимого, трудно восстановимого.

Особой разновидностью экологического вреда становится вред антропогенный, причиняемый человеку негативными воздействиями окружающей природной среды, его здоровью, состоянию будущих поколений. В его составе мы выделяем вред физиологический, причиняемый состоянию

здоровья человека, и вред генетический. Такое подразделение имеет и правовое значение, в том смысле, что вред генетический — необратим. Единственным средством нейтрализации наступления его вредных последствий является предупреждение негативного влияния антропогенных факторов на человека путем улучшения и оздоровления окружающей среды.

12.3. Принципы оценки экономического ущерба

Как показывает анализ зарубежных данных, например, ущерб от крупных промышленных аварий на химических производствах (соответствующих I—II категории аварий по отечественной классификации) составляет от 1 до 50 млн дол. США, а потери от катастроф или происшествий с чрезвычайными ситуациями могут превышать 100 млн дол. США. При этом доля ущерба от аварий может достигать 1 % валового национального продукта страны. Однако общепринятой единицей методики оценки аварийного ущерба не существует. При подсчете национальных потерь от аварий используются, как правило, данные страховых фирм и руководства предприятий.

Разработка методов оценки ущерба от аварий в промышленно развитых странах стимулируется необходимостью получения как можно точной оценки возможного ущерба для определения тарифных ставок при страховании опасных объектов. Принципы расчета тарифных ставок согласуются с методологией количественного (вероятностного) анализа риска. В этом смысле под величиной риска подразумевается математическое ожидание возможного ущерба.

В качестве примера [36] составляющих ущерба от аварии в табл. 12.1 приведены данные научно-исследовательского отдела по вопросам промышленной безопасности норвежской фирмы «Веритас» (DNV).

Как видно из таблицы, выплаты за гибель, травмирование и болезни людей приблизительно в 5—50 раз меньше убытков от нанесенного ущерба имуществу предприятия (обычно застрахованного) и сопоставимы по величине с прямыми расходами на зарплату, научные исследования, обучение и пр.

На форуме по геологоразведке и добыче (семинар нефтегазового консультативного фонда) в мае 1993 г. предложены следующие слагаемые ущерба от аварий, т. е. затраты на:

- медицинскую помощь;
- потерянное время;
- материальные и производственные убытки;
- повреждение оборудования и помещений;
- расследование;
- юридические нужды;
- чрезвычайные поставки (снабжение);
- очистку участка;

- сверхурочные работы;
- время, истраченное руководством;
- штрафы;
- утрату квалификации (опыта).

Таким образом, в общем виде в совокупный ущерб должны входить стоимость разрушаемых аварией материальных ценностей, затраты на их восстановление, компенсацию пострадавшим от аварии людям, восстановление окружающей среды и другие социально-экономические, моральные, политические, культурные потери общества.

Таблица 12.1

Составляющие ущерба от аварии

Вид расхода	Стоимость
Травмирование и болезни: медицинские услуги компенсации (страховки)	1
Балансовая стоимость имущественного ущерба: зданиям оборудованию продукции задержки производства, простои расходы: юридические на поддержание средств на ликвидацию аварий рента, аренда вспомогательного оборудования	5—50
Незастрахованная, смешанная стоимость: научные исследования зарплата на время простоя затраты на обучение замены сверхурочные работы надзорное время время конторских работников уменьшенная отдача травмированных работников после выздоровления потери в бизнесе и репутации	1—3

При рассмотрении последствий аварий необходимо различать прямой и косвенный ущерб. Прямой ущерб возникает от непосредственного разрушения материальных ценностей, повреждения здоровья людей, затрат на ликвидацию аварии и восстановление объекта. Косвенный связан с отрицательным воздействием на производительные силы общества в целом (убытки смежных предприятий, уменьшение инвестиций, изменение финансовой политики и т. д.) или возникает из-за усиления его в ходе физи-

ко-химических природных цепных реакций, идущих непосредственно в природной среде и приводящих со временем к негативному воздействию на здоровье человека и окружающую среду.

Полная оценка косвенного ущерба, как правило, весьма приближительна, в частности из-за проявления скрытых эффектов. Согласно зарубежным исследованиям, косвенный ущерб может в несколько раз превышать прямой. При этом на одну аварию со значительным ущербом приходится от 100 до 600 аварий и неполадок без травмирования и разрушения. В нашей стране, по мнению ряда специалистов, косвенный ущерб от аварий превышает прямой в 5—7 раз, а катастрофы, аварии I—II категории и неполадки соотносятся между собой примерно как 1:15:200 со средним периодом возникновения соответственно 10—15 лет, 8—12 мес. и 15—45 дней (результаты Государственной научно-технической программы «Безопасность»). Эти данные показывают, что в методике по оценке экономического ущерба от аварии необходимо по возможности учитывать все виды потерь, в том числе и от неполадок.

Формула оценки экономических потерь от аварии P_0 имеет вид

$$P_0 = P_{н.б.} + P_{о.р.} + P_{н.в.} + P_{с.э.}, \quad (12.1)$$

где: $P_{н.б.}$, $P_{о.р.}$, $P_{н.в.}$, $P_{с.э.}$ — потери соответственно части национального богатства; из-за отвлечения ресурсов на компенсацию последствий аварий; из-за неиспользования возможностей вследствие аварии; социально-экономические.

$P_{н.б.}$ включают в себя потери в результате уничтожения аварией основных производственных фондов; товарно-материальных ценностей (оборотных фондов, материальных ресурсов текущего потребления); личного имущества населения; природных ресурсов (экологический ущерб), а также потери, связанные с повреждением основных производственных и непроизводственных фондов.

При уничтожении основных фондов потери ($P_{у(ноф)}$) определяются исходя из остаточной стоимости S_0 за вычетом стоимости остатков S_m , годных к дальнейшему использованию, и ликвидационной стоимости S_l (рассчитывается для каждого вида материальных ценностей):

$$P_{у(ноф)} = S_0 - (S_u + S_l). \quad (12.2)$$

S_0 получаем из выражения:

$$S_0 = S_n (1 - H_a T_э / 100), \quad (12.3)$$

где: S_n — первоначальная стоимость основных фондов данного вида (с учетом инфляции);

H_a — норма амортизационных отчислений по основным фондам, %;

$T_э$ — продолжительность эксплуатации основных фондов, годы.

Отметим, что, согласно представляемым в Госгортехнадзор России сведениям, $P_{у(ноф)}$ — основная доля величины ущерба от происшедших аварий.

При этом из-за изношенности основных фондов на некоторых предприятиях величина $\Pi_{y(ноф)}$ может быть невелика и значительно меньше косвенных потерь (например, от недополученной прибыли, простоев смежных предприятий).

$\Pi_{о.р.}$ из формулы (12.1) — потери в результате отвлечения ресурсов на восстановление объекта после аварии и пострадавших от аварии природных ресурсов (экологический ущерб).

$\Pi_{н.в.}$ — это потери от простоя объекта в результате аварии (упущенные экономические выгоды) и потери при выбытии трудовых ресурсов из производственной деятельности в результате аварии.

$\Pi_{с.э.}$ включают социально-экономические потери при травмировании людей во время аварии (выплата пособий по временной нетрудоспособности, пенсий лицам, ставшим инвалидами; расходы на клиническое и санитартно-курортное лечение); при гибели людей (выплаты пособий на погребение и пенсий по случаю потери кормильца в результате аварии).

Для определения оптимальных условий функционирования объекта по критериям «стоимость — безопасность — выгода» интерес также представляет прогноз ущерба от возможной аварии с учетом ее вероятности (риска). Математическое ожидание потерь части национального богатства вследствие аварии можно определить по формуле

$$M(\Pi_{н.б.}) = FB(C_{1уд} R_y + C_{2уд} R_n), \quad (12.4)$$

где: F — площадь зоны разрушения на объекте, m^2 (для пожара определяется по приложениям ГОСТ 12.1.004.91);

B — вероятность анализируемой аварийной ситуации, 1/год

$C_{1уд}$ — удельная стоимость материальных ценностей на объекте;

$C_{2уд}$ — удельная стоимость ремонтных работ, руб./ m^2 ;

R_y — доля уничтоженных материальных ценностей на объекте;

R_n — доля поврежденных материальных ценностей на объекте

$C_{1уд}$ и $C_{2уд}$ должны определяться с учетом инфляции.

Можно показать, что зависимость $M(\Pi_{н.б.})$ от B должна иметь максимум $M_{\max}$. На практике вероятность B аварийной ситуации уменьшается с ростом тяжести (ущерба) ее последствий, а ущерб при этом ограничен энергетическим потенциалом объекта (или массой используемых опасных веществ). В то же время ущерб от частых, но мелких неполадок невелик или вообще не рассматривается с точки зрения аварийного ущерба. Определение наиболее опасного сценария аварии по критерию максимума $M_{\max}$ — одна из главных задач количественного анализа риска.

Наиболее сложно при определении экономического ущерба от аварии оценить экологический ущерб. Существующие предложения по разработке практически полезных методик требуют создания мощной системы экологического мониторинга. Несмотря на существование научно обоснованных подходов к оценке экологического ущерба, реальный учет влияния крупных аварий на окружающую среду ограничивается качественными оценками.

Чтобы определить экологический ущерб, можно использовать различные нормативные документы природоохранных ведомств, регламентирующих выплаты за загрязнение окружающей среды в предположении, что эти выплаты и есть экологический ущерб.

Для оценки экологических потерь существует ряд нормативных документов.

Методический подход к этим документам основан на эмпирическом принципе регулирования экологической безопасности путем взимания платы (форма штрафных санкций) как за произошедшее, так и потенциально возможное загрязнение при выбросе вредных веществ. Плата взимается за следующие виды вредного воздействия:

- выброс в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников;
- сброс загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты;
- размещение отходов;
- загрязнение земли, леса и др.

Устанавливаются два вида базовых нормативов платы за выбросы, сбросы и прочие воздействия в пределах:

- допустимых нормативов;
- установленных лимитов (временно согласованных нормативов).

Плата при сверхлимитном загрязнении, которое, как правило, реализуется при аварии, 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. При этом учитываются показатели экологических факторов по регионам, степень опасности загрязняющего вещества, темпы инфляции.

П Р И Л О Ж Е Н И Е 1

Таблица значений функции $y = \exp(-x)$

x	y	x	y	x	y	x	y
0,00	1,000	0,40	0,670	0,80	0,449	3,00	0,050
0,01	0,990	0,41	0,664	0,81	0,445	3,10	0,045
0,02	0,980	0,42	0,657	0,82	0,440	3,20	0,041
0,04	0,961	0,44	0,644	0,84	0,432	3,40	0,033
0,06	0,942	0,46	0,631	0,86	0,423	3,60	0,027
0,08	0,923	0,48	0,619	0,88	0,415	3,80	0,022
0,10	0,905	0,50	0,606	0,90	0,407	4,00	0,0183
0,12	0,887	0,52	0,595	0,92	0,399	4,20	0,0150
0,14	0,869	0,54	0,583	0,94	0,391	4,40	0,0123
0,16	0,852	0,56	0,571	0,96	0,383	4,60	0,0101
0,18	0,835	0,58	0,560	0,98	0,375	4,80	0,0082
0,20	0,819	0,60	0,549	1,00	0,368	5,00	0,0067
0,22	0,803	0,62	0,538	1,20	0,302	5,20	0,0055
0,24	0,787	0,64	0,527	1,40	0,247	5,40	0,0045
0,26	0,771	0,66	0,517	1,60	0,202	5,60	0,0037
0,28	0,756	0,68	0,507	1,80	0,165	5,80	0,0030
0,30	0,741	0,70	0,497	2,00	0,135	6,00	0,0025
0,32	0,726	0,72	0,487	2,20	0,111	6,20	0,0020
0,34	0,712	0,74	0,477	2,40	0,091	6,40	0,0017
0,36	0,698	0,76	0,468	2,60	0,074	6,60	0,0014
0,38	0,684	0,78	0,458	2,80	0,061	6,80	0,0011
0,40	0,670	0,80	0,449	3,00	0,050	7,00	0,0009

Примечание. Для $x < 0,01$ можно принимать $y = \exp(-x) \approx 1 - x$.

П Р И Л О Ж Е Н И Е 2

Значения гамма-функции

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,919906
1,01	0,99433	1,26	0,90440	1,51	0,88659	1,76	0,92137
1,02	0,98884	1,27	0,90250	1,52	0,88704	1,77	0,92376
1,03	0,98355	1,28	0,90072	1,53	0,88757	1,78	0,92623
1,04	0,97844	1,29	0,89904	1,54	0,88818	1,79	0,92877
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93188
1,06	0,96874	1,31	0,89600	1,56	0,88964	1,81	0,93408
1,07	0,96415	1,32	0,89464	1,57	0,89049	1,82	0,93685
1,08	0,95973	1,33	0,89338	1,58	0,89142	1,83	0,93369
1,09	0,95546	1,34	0,89222	1,59	0,89243	1,84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
1,11	0,94740	1,36	0,89018	1,61	0,89468	1,86	0,94869
1,12	0,94359	1,37	0,88931	1,62	0,89592	1,87	0,95184
1,13	0,93993	1,38	0,88854	1,63	0,89724	1,88	0,95507
1,14	0,93642	1,39	0,88785	1,64	0,89864	1,89	0,95838
1,15	0,93304	1,40	0,88726	1,65	0,90012	1,90	0,96177
1,16	0,92980	1,41	0,88676	1,66	0,90167	1,91	0,96523
1,17	0,92670	1,42	0,88636	1,67	0,90330	1,92	0,96877
1,18	0,92373	1,43	0,88604	1,68	0,90500	1,93	0,97240
1,19	0,92089	1,44	0,88581	1,69	0,90678	1,94	0,97610
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,95	0,97988
1,21	0,91558	1,46	0,88560	1,71	0,91057	1,96	0,98374
1,22	0,91311	1,47	0,88563	1,72	0,91258	1,97	0,98768
1,23	0,91075	1,48	0,88575	1,73	0,91467	1,98	0,99171
1,24	0,90852	1,49	0,88595	1,74	0,91683	1,99	0,99581
						2,00	1,00000

П Р И Л О Ж Е Н И Е 3

Значение нормальной функции распределения
 $F(t) = 0,5 + \Phi(u)$

u	$F(t)$	u	$F(t)$	u	$F(t)$
−0,00	0,500	−1,60	0,055	0,80	0,788
−0,10	0,460	−1,70	0,044	0,90	0,816
−0,20	0,420	−1,80	0,036	1,00	0,841
−0,30	0,382	−2,00	0,023	1,20	0,885
−0,40	0,344	−2,20	0,014	1,30	0,903
−0,50	0,308	−2,40	0,008	1,40	0,919
−0,60	0,274	−2,60	0,005	1,50	0,933
−0,70	0,242	−2,80	0,003	1,60	0,945
−0,80	0,212	−3,00	0,001	1,70	0,955
−0,90	0,184	0,10	0,540	1,80	0,964
−1,00	0,159	0,20	0,579	2,00	0,977
−1,10	0,136	0,30	0,618	2,20	0,986
−1,20	0,115	0,40	0,655	2,40	0,992
−1,30	0,097	0,50	0,691	2,60	0,995
−1,40	0,080	0,60	0,726	2,80	0,997
−1,50	0,067	0,70	0,758	3,00	0,999

П Р И Л О Ж Е Н И Е 4

Значения функции $F(x)$

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	0,	5398	5438	5748	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
0,2	0,	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,4	0,	6551	6594	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,6	0,	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
0,8	0,	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
1,0	0,	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
1,2	0,	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	9015
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056	3189
1,6	0,9	4520	4630	4738	4855	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
2,0	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124	8169
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537	8574
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870	8899
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431	3613
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319	6427
2,8	0,99	7445	7523	7599	7673	7744	7814	7882	7948	8012	8074
3,0	0,99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965	8999
3,1	0,999	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2378	2636	2886
3,2	0,999	3129	3363	3590	3810	4022	4230	4429	4623	4810	4991
3,4	0,999	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7398	7439	7585
3,6	0,999	8409	8469	8527	8583	8637	8689	8739	8787	8834	8879
3,8	0,9999	2765	3052	3327	3593	3848	4094	4331	4558	4777	4988
4,0	0,9999	6833	6964	7090	7211	7327	7439	7546	7649	7748	7843
4,2	0,9999	8665	8723	8778	8832	8882	8931	8978	9023	9066	9107
5,0	0,999999	7134	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. При $x \geq 4$ значения $F(x)$ можно принимать ≈ 1 .

П Р И Л О Ж Е Н И Е 5

Основные понятия, термины и определения

АВАРИЯ — опасное происшествие в технической системе, на промышленном объекте или на транспорте, создающее угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению производственных помещений, сооружений, серьезному повреждению или уничтожению оборудования, механизмов, транспортных средств, сырья и готовой продукции, к нарушению производственного процесса и нанесению ущерба окружающей природной среде.

АВАРИЯ ЗАПРОЕКТНАЯ — авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами систем безопасности, исключая единичный отказ, реализацией ошибочных решений персонала, которые могут привести к тяжелым последствиям.

АВАРИЯ ПРОЕКТНАЯ — авария, для которой проектом определены исходные события и конечные состояния и предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие, с учетом принципа единичного отказа систем безопасности или с учетом одной, независимой от исходного события ошибки персонала, ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами.

АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ — состояние технической системы, объекта, характеризующееся нарушением пределов и (или) условий безопасной эксплуатации и не перешедшее в аварию.

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ — анализ и расчет опасностей, связанных с осуществлением предполагаемой деятельности.

АНАЛИЗ ОПАСНОСТЕЙ — выявление нежелательных событий, влекущих за собой реализацию опасности, анализ механизмов возникновения подобных ситуаций и, как правило, оценка масштаба, величины и вероятности любого события, способного оказать поражающее действие.

АНАЛИЗ РИСКА — процесс выявления (идентификации) и оценки опасностей для отдельных лиц, групп населения, объектов, окружающей природной среды и других объектов рассмотрения.

БЕЗОПАСНОСТЬ — состояние защищенности человека, общества, окружающей среды от чрезмерной опасности; свойство реальных процессов и систем, содержащих источники угрозы и их возможные жертвы, сохранять состояние с приемлемой возможностью причиненного ущерба от происшествий; состояние объектов и систем в условиях приемлемого риска; свойство системы «человек — среда обитания» сохранять условия взаимодействия с минимальной возможностью возникновения ущерба людским, природным и материальным ресурсам.

БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ — соблюдение установленных проектом минимальных условий по количеству, характеристикам, состоянию работоспособности и регламенту технического обслуживания систем или элементов (важных для безопасности), при которых обеспечивается соблюдение пределов безопасной эксплуатации и (или) критериев безопасности.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ (ЧС) — состояние защищенности населения, объектов народного хозяйства и окружающей природной среды от опасностей в чрезвычайных ситуациях.

БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ В ЧС — состояние защищенности жизни и здоровья людей, их имущества и среды обитания человека от опасностей в чрезвычайных ситуациях.

ВЗРЫВ — быстропротекающий процесс физических и химических превращений веществ, сопровождающийся освобождением большого количества энергии в ограниченном объеме, в результате которого в окружающем пространстве образуется и распространяется ударная волна, способная создать угрозу жизни и здоровью людей, нанести ущерб хозяйственным и иным объектам и стать источником ЧС.

ВРЕДНЫЙ ФАКТОР — негативный фактор, воздействие которого на человека приводит к заболеванию.

ВЫБОР ПЛОЩАДКИ — процесс выбора подходящей площадки для промышленного предприятия, включая соответствующую оценку и определение критериев, закладываемых в основу проекта.

ДОБРОВОЛЬНАЯ ОПАСНОСТЬ — опасность, наличие которой принимается добровольно. Примеры добровольных опасностей: аварии промышленных предприятий для персонала, занятия горными лыжами или дельтапланеризмом, курение, вождение автомобиля и т. п.

ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТЬ — способ существования или повседневная деятельность человека.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПАСНОСТИ — процесс выявления и признания, что опасность существует, и определения ее характеристик.

ИНЦИДЕНТ — отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от режима технологического процесса, нарушение законодательных и иных нормативных правовых актов Российской Федерации, а также нормативных технических документов, устанавливающих правила ведения работ на опасном производственном объекте.

ИСТОЧНИК ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ — опасное природное явление или антропогенное происшествие, широко распространенное заболевание людей, животных и растений, а также современное средство поражения, в результате применения которого возникла или может возникнуть чрезвычайная ситуация.

ИСХОДНЫЕ СОБЫТИЯ — единичный отказ в системах, внешнее событие или ошибка персонала, которые приводят к нарушению нормальной эксплуатации и могут привести к нарушению пределов и (или) условий безопасной эксплуатации.

ЗАЩИТА ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ — комплекс организационных, экономических, инженерно-технических, природоохранных и специальных мероприятий, направленных на предупреждение возникновения чрезвычайной ситуации, преодоление вызванных ею опасностей и их ликвидацию с целью сохранения жизни и здоровья людей, снижения ущерба народному хозяйству, личному имуществу граждан и окружающей природной среде.

КАТАСТРОФА — крупная авария, повлекшая за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и разрушения или уничтожение объектов и других материальных ценностей в значительных размерах, а также приведшая к серьезному ущербу окружающей среде.

НАДЕЖНОСТЬ — свойство объекта выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования. Надежность — комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать ряд свойств (в отдельности или в определенном сочетании), основными из которых являются следующие: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, устойчивоспособность, режимная управляемость и живучесть.

НЕГАТИВНАЯ СИТУАЦИЯ — состояние системы «человек — среда обитания», характеризующееся отклонением от условий безопасного взаимодействия.

НЕКОНТРОЛИРУЕМАЯ РЕАКЦИЯ — химическая реакция, протекающая либо в условиях промышленного предприятия и не предусмотренная технологией, либо протекающая в технологической установке в режимах, не позволяющих управлять параметрами процесса.

НЕОБНАРУЖЕННЫЙ ОТКАЗ — отказ системы (элемента), который не проявляется в момент своего возникновения при нормальной эксплуатации и не выявляется предусмотренными средствами контроля в соответствии с регламентом техобслуживания и проверок.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИЛИ УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ — системный подход к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба имуществу и окружающей среде; комплекс организационных и инженерно-технических мероприятий по предотвращению промышленных аварий или катастроф и уменьшению ущерба от обусловленных ими последствий.

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА — все объекты и условия, в которых протекает и с которыми связана жизнь и деятельность человека.

ОКРУЖАЮЩАЯ ПРИРОДНАЯ СРЕДА — естественная среда обитания человека, биосфера, служащая условием, средством и местом жизни человека и других живых организмов; в широком смысле включает природу как систему естественных экологических систем и окружающую среду как ту часть естественной среды, которая преобразована в результате деятельности человека.

ОСОБО ОПАСНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ (ПРОМЫШЛЕННЫЙ) ОБЪЕКТ — участок, установка, цех, хранилище, склад, станция или другое производство, на котором одновременно используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют взрывопожароопасные или опасные химические вещества в количестве, равном или превышающем определенное пороговое значение.

ОПАСНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ (ПРОМЫШЛЕННЫЙ) ОБЪЕКТ — объект, производство, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют пожаровзрывоопасные и (или) опасные химические вещества, создающие реальную угрозу возникновения аварии.

ОПАСНОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО — химическое вещество природного или искусственного происхождения, применяемое в промышленности, сельском хозяйстве и в быту, оказывающее при превышении естественного уровня его содержания в окружающей природной среде вредное воздействие на человека, сельскохозяйственных животных и растения, элементы окружающей природной среды.

ОПАСНОСТЬ — негативное свойство системы «человек — среда обитания», способное причинять ущерб и обусловленное энергетическим состоянием среды и действиями человека; ситуация (в природе или техносфере), в которой возможно возникновение явлений или процессов, способных поражать людей, наносить материальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую человека среду.

ОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ — состояние, при котором создалась или возможна угроза возникновения явлений или процессов, способных поражать людей, наносить материальный ущерб их имуществу, государственной и другим видам собственности, а также негативно воздействовать на окружающую природную среду в зоне ЧС.

ОПАСНОСТЬ ОСНОВНАЯ — опасность, способная привести к крупной аварии.

ОПАСНЫЕ ГРУЗЫ — вещества, материалы, изделия и отходы производства, которые в силу своих физических, химических и биологических свойств могут создать угрозу жизни и здоровью людей, вызвать загрязнение окружающей среды, повреждение и уничтожение транспортных средств и иного имущества и объектов.

ОПАСНОЕ ПРИРОДНОЕ ЯВЛЕНИЕ — событие природного происхождения или состояние элементов природной среды, которое по интенсивности, масштабу распространения и продолжительности может оказать негативное воздействие на жизнедеятельность людей, хозяйственные и иные объекты, окружающую природную среду.

ОПАСНЫЙ ФАКТОР — негативный фактор, воздействие которого на человека приводит к травме или летальному исходу.

ОТКАЗ (НЕПОЛАДКА) — событие, заключающееся в нарушении работоспособности состояния оборудования, объекта.

ОТКАЗ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ — неспособность ряда устройств или узлов выполнять свои функции в результате единичного конкретного события или причины. К таковым обычно относят недостаток проекта, погрешность в изготовлении, ошибки во время эксплуатации и технического обслуживания, природное явление, вызванное деятельностью человека событие, насыщение сигналов или непреднамеренные нарастающие последствия от любой другой операции, или отказа на технологической установке, или от изменения условий окружающей среды.

ОТРАВЛЕНИЕ — результат воздействия химического или другого ядовитого вещества на человека, приведший к заболеванию или летальному исходу.

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ — сравнение результатов анализа безопасности с приемлемыми критериями, их оценка и окончательные заключения по пригодности оцениваемой системы.

ОЦЕНКА РИСКА — процесс, используемый для определения степени риска анализируемой опасности для здоровья человека, имущества или окружающей среды. Оценка риска включает анализ частоты, анализ последствий и их сочетание; идентификация опасности и возможных ее источников, исследование механизма их возникновения, оценка вероятности возникновения идентифицированных опасных событий и их последствий, а также сум-

мирование вероятностей возникновения опасности и ее последствий для всех возможных вариантов развития ситуации.

ОШИБКА ПЕРСОНАЛА — единичное неправильное действие при управлении техническими системами или единичный пропуск правильного действия, важных для безопасности.

ОШИБОЧНОЕ РЕШЕНИЕ — неправильное, непреднамеренное выполнение или невыполнение ряда последовательных действий из-за неверной оценки протекающих технологических процессов.

ПЕРСОНАЛ — все лица, работающие с техническими системами постоянно или временно.

ПЛОЩАДКА — участок, на котором находится промышленное предприятие, имеющий границу и находящийся под эффективным контролем административного руководства промышленного предприятия (организации-исполнителя).

ПОКАЗАТЕЛЬ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИИ — измеренная или рассчитанная величина, количественно характеризующая вероятность или частоту возникновения аварии.

ПОРАЖАЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИСТОЧНИКА ЧС — негативное влияние различных факторов источника ЧС на жизнь и здоровье людей, сельскохозяйственных животных и растений, хозяйственные и др. объекты, окружающую природную среду.

ПОРАЖАЮЩИЙ ФАКТОР ИСТОЧНИКА ЧС — составляющая опасного явления или процесса физического, химического или биологического (бактериального) характера, вызываемого источником ЧС и приводящего к поражению людей, сельскохозяйственных животных и растений, хозяйственных и иных объектов, элементов окружающей природной среды.

ПОЖАР — неконтролируемый процесс горения, сопровождающийся уничтожением ценностей и создающий опасность для жизни и здоровья людей, сельскохозяйственных животных, растений и окружающей Среды.

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ — состояние объекта народного хозяйства или иного назначения, при котором путем выполнения правовых норм, противопожарных и инженерно-технических мероприятий исключается или снижается вероятность возникновения и развития пожара, воздействия на людей опасных факторов пожара, а также обеспечивается защита материальных ценностей.

ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОЕ ВЕЩЕСТВО — вещество, которое вследствие своих физических, химических, биологических или токсикологических свойств предопределяет собой опасность для жизни и здоровья людей.

ПРЕДЕЛЫ БЕЗОПАСНОСТИ — пределы изменения процесса, в которых, как показано, эксплуатация промышленного предприятия является безопасной.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОТЕРЬ — область человеческой деятельности по предотвращению аварий промышленных предприятий и уменьшению последствий чрезвычайных ситуаций, обусловленных такими авариями. Основные направления этой деятельности — обеспечение безопасности человека и промышленного предприятия в техносфере.

ПРИНУДИТЕЛЬНАЯ ОПАСНОСТЬ — опасность, которая вводится помимо желания людей, принудительно. Примеры принудительных опасностей — аварии промышленных предприятий для населения.

ПРОИСШЕСТВИЕ — событие, состоящее из воздействия опасного фактора с причинением ущерба людским, природным и материальным ресурсам.

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ — состояние, при котором путем соблюдения правовых норм, экономических, инженерно-технических и технологических требований, а также проведения соответствующих мероприятий достигается предотвращение нарушений технологического процесса и техники безопасности, максимальное снижение вероятности возникновения аварийной ситуации на промышленных объектах и транспорте или уменьшение ущерба; область человеческой деятельности по предотвращению аварий промышленных предприятий и уменьшению последствий чрезвычайных ситуаций, обусловленных такими авариями. Основные направления деятельности — обеспечение безопасности человека и промышленного предприятия в техносфере и экологической безопасности.

ПРОМЫШЛЕННАЯ КАТАСТРОФА — крупная промышленная авария, повлекшая за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей либо разрушение и уничтожение объектов, материальных ценностей в значительных размерах, а также приведшая к серьезному ущербу окружающей природной среде.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБЪЕКТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПОДЛЕЖАЩИЙ ДЕКЛАРИРОВАНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ — субъект предпринимательской деятельности (организация), имеющий в своем составе одно или несколько производств повышенной опасности, расположенных на единой площадке. Такие производства в дальнейшем называются «особо опасные».

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ — совокупность технологических установок для выпуска определенных продуктов или продукции, размещаемых на определенной площадке.

ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИИ — возникшая в результате аварии обстановка, наносящая ущерб за счет превышения установленных пределов воздействия на персонал, население и окружающую среду.

ПРОЕКТНЫЕ ПРЕДЕЛЫ — значения параметров и характеристик состояния систем (элементов) в целом, установленные в проекте для нормальной эксплуатации, аварийных ситуаций и аварий.

РИСК АКТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СУБЪЕКТА (психолог. термин) — действие, направленное на привлекательную цель, достижение которой сопряжено с элементами опасности, угрозой потери, неуспеха; ситуативная характеристика деятельности, состоящая в неопределенности ее исхода и возможных неблагоприятных последствиях в случае неуспеха; мера неблагоприятия при неуспехе в деятельности, определяемая сочетанием вероятности и величины неблагоприятных последствий в этом случае.

РИСК, или степень риска, — это сочетание частоты (или вероятности) и последствий определенного опасного события. Понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия этого события; реализации опасностей определенного класса. Риск может быть определен как частота (размерность — обратное время) или как вероятность возникновения одного события при наступлении другого события (безразмерная величина, лежащая в пределах от 0 до 1).

РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ (РИСК ЧС) — вероятность или частота возникновения ЧС.

РИСК ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ — вероятность реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций для одного человека или социальной группы.

РИСК ПРИЕМЛЕМЫЙ — риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из экономических и социальных соображений. Риск эксплуатации промышленного объекта является приемлемым, если его величина настолько незначительна, что ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на этот риск.

РИСК СОЦИАЛЬНЫЙ — характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений в обществе, социально-политических преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу — это риск для группы или сообщества людей.

РИСК ТЕХНИЧЕСКИЙ — комплексный показатель надежности элементов техносферы, который выражает вероятность возникновения аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений.

РИСК ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ — вероятность возникновения экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного, техногенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия.

РИСК ЭКОНОМИЧЕСКИЙ — вероятность экономических потерь в будущем; соотношение пользы и вреда, получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности.

РИСКУЮЩИЕ — человек или социальная группа, на которых может быть оказано воздействие определенного вида при реализации определенной опасности или определенных опасностей, т. е. для которых индивидуальный или социальный риск не является нулевым или же достигает определенного уровня.

СИСТЕМЫ (ЭЛЕМЕНТЫ) БЕЗОПАСНОСТИ — системы (элементы), предназначенные для выполнения функций безопасности.

СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ — совокупность законодательных, технических, медицинских и биологических мероприятий, направленных на поддержание равновесия между биосферой и антропогенными, техногенными, а также стихийными внешними нагрузками.

СМЕРТНОСТЬ — число погибших в определенных условиях.

СРЕДА ОБИТАНИЯ — окружающая человека среда, обусловленная в данный момент совокупностью факторов (физических, химических, биологических, социальных), способных оказывать прямое или косвенное, немедленное или отдаленное воздействие на деятельность человека, его здоровье и потомство.

СТИХИЙНОЕ БЕДСТВИЕ — разрушительное природное и (или) природно-антропогенное явление, в результате которого может возникнуть или возникает угроза жизни и здоровью людей, происходит разрушение или уничтожение материальных ценностей и элементов окружающей природной среды.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАТАСТРОФА — катастрофа, возникшая вследствие нарушения технологического процесса и повлекшая за собой гибель людей и угрозу здоровью персонала, нанесящая существенный прямой или косвенный ущерб материальным ценностям и окружающей природной среде.

ТЕХНОЛОГИЯ — совокупность приемов и методов обработки в производственных процессах; способ производства и (или) переработки продукции в совокупности с приборно-аппаратным оформлением.

ТЕХНОЛОГИЯ С «ВНУТРЕННЕ ПРИСУЩЕЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ» — технология, предусматривающая подавление опасностей и (или) существенное уменьшение последствий недопустимых отклонений от технологического регламента на основе механизмов, базирующихся на фундаментальных законах природы, а не путем включения специальных систем обеспечения безопасности.

ТЕХНОГЕННАЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ — состояние, при котором в результате возникновения источника техногенной чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде.

ТОКСИЧНОСТЬ — свойство вещества приводить к смерти или вредить здоровью живого существа при попадании в его организм с водой, пищей (перорально); через кожу или кровь (кожно-резорбтивно); при вдыхании (ингаляционно).

ТРЕБОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ — условия, запреты, ограничения и другие обязательные требования, содержащиеся в Федеральном законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», других федеральных законах и иных нормативных правовых актах РФ, а также в нормативных технических документах, которые принимаются в установленном порядке и соблюдение которых обеспечивает промышленную безопасность.

УГРОЗА ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ (УГРОЗА ЧС) — состояние, при котором создается опасность для населения, его имущества и иных видов собственности и окружающей природной среды в зоне ЧС.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ — часть системного подхода к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба материальным ценностям и окружающей природной среде.

ХИМИЧЕСКАЯ АВАРИЯ — авария, сопровождающаяся утечкой или выбросом опасных химических веществ из технологического оборудования или поврежденной тары, способная привести к гибели или заражению людей, сельскохозяйственных животных и растений, либо загрязнению химическими веществами окружающей природной среды в опасных для людей, животных и растений концентрациях.

ХИМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ — состояние, при котором путем соблюдения правовых норм и санитарно-гигиенических правил, выполнения инженерно-технических и технологических требований, а также проведения соответствующих организационных и специальных мероприятий исключаются условия для химического заражения или поражения людей, сельскохозяйственных животных и растений, загрязнения окружающей природной среды опасными химическими веществами в случае возникновения химической аварии.

ХИМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ — опасность, связанная с химическими веществами или процессами. Основные формы проявления химических опасностей — пожар, взрыв, токсическое поражение.

ХИМИЧЕСКОЕ ЗАРАЖЕНИЕ — распространение опасных химических веществ в окружающей природной среде в концентрациях или количествах, создающих угрозу для людей, сельскохозяйственных животных и растений в течение определенного времени.

ЧРЕЗВЫЧАЙНОЕ ОБСТОЯТЕЛЬСТВО — негативное событие, вызванное источником чрезвычайной ситуации либо массовыми беспорядками и приведшее к гибели людей или угрозе их жизни и здоровью, ущербу государственной и другим видам собственности, личному имуществу граждан и окружающей природной среде на определенной территории.

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР — комплекс психофизиологических особенностей человека (восприятие информации, принятие решений, психологические установки и т. п.), играющий важную роль в промышленной безопасности.

ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ (ЧС) — нарушение нормальной жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, массовыми заболеваниями животных или растений, а также применением противником современных средств поражения и приведшие или могущие привести к людским и материальным потерям.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ — состояние защищенности жизненно важных экологических интересов личности, общества, природы и государства от реальных и потенциальных угроз, создаваемых антропогенным, техногенным или естественным воздействием на окружающую среду.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ — вся деятельность, направленная на достижение безопасным образом цели, для которой было построено промышленное предприятие, включая техническое обслуживание, инспектирование во время эксплуатации и другую связанную с этим деятельность.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ — значения параметров и характеристик состояния систем (элементов), заданные проектом для нормальной (безопасной) эксплуатации.

Б И Б Л И О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С П И С О К

1. Акимов В. А., Козлов К. А., Шахраманьян М. А. Оценка природной и техногенной безопасности России: теория и практика. — М.: ФИД «Деловой экспресс», 1998. — 218 с.
2. Акимов В. А., Новиков В. Д., Радаев Н. Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. — М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2001. — 344 с.
3. Акимов В. А., Воробьев Ю. Л., Фалеев М. И. Оценка и прогноз стратегических рисков России: постановка проблемы // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. № 1, 2002 г., с 10—18.
4. Ахлюстин В. Н., Новиков Г. А., Щукин В. А. Возможный подход к прогнозам аварии в сложной технической системе // Безопасность труда в промышленности. 1992. № 6. С. 57—59.
5. Безопасное взаимодействие человека с техническими системами / В. Л. Лапин, Ф. Н. Рыжков, В. М. Попов, В. И. Томаков. Курск, 1995. — 238 с.
6. Безопасность жизнедеятельности: Краткий конспект лекций для студентов всех специальностей/Под ред. О. Н. Русака. Л., 1991. 147 с.
7. Беляев Б. М. Безопасность систем с техникой повышенного риска // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 4. М., 1997. С. 23—36.
8. Блинкин В. Л. Методы анализа экзогенных составляющих рисков// Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 3. М., 1997. С. 18—36.
9. Бондарь В. А., Попов Ю. П. Риск, надежность и безопасность. Система понятий и обозначений // Безопасность труда в промышленности. 1997. № 10. С. 39—42.
10. Браун Дэвид Б. Анализ и разработка систем обеспечения техники безопасности: (системный подход в технике безопасности) / Пер. с англ. А. Н. Жовинского. — М.: Машиностроение, 1979. — 360 с.

11. Васильев В. Г. Безопасность промышленного предприятия от внешних опасных факторов // Безопасность труда в промышленности. 1994. № 10. С. 31—35.
12. Воробьев Ю. Л. Основные направления государственной стратегии снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации на период до 2010 года // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 4. — М.: 1997. С. 3—22.
13. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М.: Советское радио, 1972. — 552 с.
14. Голубков Е. П. Использование системного анализа в отраслевом планировании. — М.: Экономика, 1977. — 135 с.
15. Гончаров В. А., Хлыстов В. П., Скопинцев В. А. Промышленная безопасность на объектах ТЭК России // Безопасность труда в промышленности. 1995. № 1. С. 38—39.
16. Декларирование безопасности промышленного объекта / А. С. Печеркин, В. И. Сидоров, Б. А. Красных и др. // Безопасность труда в промышленности. 1996. № 7. С. 2—17.
17. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. — М.: Мир, 1984. 318 с.
18. Дюфур Г. А., Жаринов К. А., Лесохин А. И. и др. Технические средства управления уровнем безопасности химических производств // Журн. Всесоюзн. хим. общества им. Д. И. Менделеева. Т. 35. 1990. № 4. С. 424—427.
19. Евланов Л. Г. Теория и практика принятия решений. — М.: Экономика, 1984. 176 с.
20. Евстафьев Н. Б., Яценко А. И. Количественные аспекты оценки опасности размещения объектов по уничтожению химического оружия // Журн. Всесоюзн. хим. общества им. Д. И. Менделеева. Т. 35. 1990. № 1. С. 119—121.
21. Еременко В. А. От безопасности в промышленности к безопасности проживания в промышленных регионах // Безопасность труда в промышленности. 1992. № 7. С. 2—21.
22. Заиков Г. Е., Маслов С. А., Рубайло В. Л. Кислотные дожди и окружающая среда. — М.: Химия, 1991. 144 с.
23. Закон Российской Федерации «О безопасности» / Сборник Законодательных актов Российской Федерации. — М.: Издательство «Республика», 1993. С. 6—18.
24. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: Учебное пособие / Под общ. ред. М. И. Фалеева. — Калуга. ГУП «Облиздат», 2001. — 480 с.

25. Измалков А. В., Бодриков О. В. Методологические основы управления риском и безопасностью населения и территорий // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 1. — М.: 1997. С. 48—62.
26. Кловач Е. В., Сидоров В. И. Законодательство в области промышленной безопасности // Безопасность труда в промышленности. 1994. № 9. С. 36—45.
27. Козлитин А. М., Попов А. И. Оценка риска при декларировании безопасности химических производств // Безопасность труда в промышленности. 1997. № 2. С. 21—24.
28. Кох П. И. Климат и надежность машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 176 с.
29. Кравец В. А. Системный анализ безопасности в нефтяной и газовой промышленности. — М.: Недра, 1984. — 117 с.
30. Краткий психологический словарь / Сост. Л. А. Карпенко; Под общ. ред. А. В. Петровского, М. Г. Ярошевского. — М.: Политиздат, 1985. — 431 с.
31. Кузьмин И. И. Безопасность и техногенный риск: системно-динамический подход // Журн. Всесоюзн. хим. общества им. Д. И. Менделеева. Т. 35. 1990. № 4. С. 15—20.
32. Кузьмин И. И., Шапошников Д. А. Концепция безопасности: от риска «нулевого» — к «приемлемому» // Вестник РАН. Т. 64. 1994. № 5. С. 402—408.
33. Ларичев О. И. Проблемы принятия решений с учетом факторов риска и безопасности // Вестник АН СССР. 1987. № 11. С. 38—45.
34. Легасов В. А., Чайванов Б. Б., Черноплеков А. Н. Научные проблемы безопасности техносферы // Безопасность труда в промышленности. 1988. № 1. С. 44—51.
35. Легасова М. М. Путь к концепции безопасности // Журн. Всесоюзн. хим. общества им. Д. И. Менделеева. Т. 35. 1990. № 4. С. 405—408.
36. Лисанов М. В., Печеркин А. С., Сидоров В. И. Принципы оценки экономического ущерба от промышленных аварий // Экология промышленного производства. 1995. № 6. С. 49.
37. Лобанов Ф. И., Шапиро М. М. Экологический риск в промышленности. Оценка и управление // Журн. Всесоюзн. хим. общества им. Д. И. Менделеева. Т. 35. 1990. № 1. С. 125—128.
38. Маршалл В. Основные опасности химических производств: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 672 с.
39. Озерская Т. Медицина катастроф // Охрана труда и социальное страхование. 1996. № 8. С. 49—51.

40. Меламедов И. М. Физические основы надежности. — Л.: Энергия, 1970. — 152 с.
41. Методические указания по проведению анализа риска особо опасных промышленных объектов / Ю. А. Додонов, А. С. Решетов, В. И. Ефименко и др. // Безопасность труда в промышленности. 1995. № 9. С. 38—41.
42. Мечитов А. И., Ребрик С. Б. Изучение субъективных факторов восприятия риска и безопасности // Человеко-машинные процедуры принятия решений: Сб. научн. тр. Вып. 11. — М.: ВНИИСИ, 1988. С. 77—89.
43. Муромцев Ю. Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах. — М.: Химия, 1990. — 144 с.
44. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений: Пер. с нем. — М.: Мир, 1990. — 208 с.
45. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Т. 1: Методология. Организация. Терминология / Под ред. А. И. Рембезы. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.
46. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Т. 5: Проектный анализ надежности / Под ред. В. И. Патрушева и А. И. Рембезы. — М.: Машиностроение, 1988. — 316 с.
47. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Т. 10: Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности / Под общ. ред. В. А. Кузнецова. — М.: Машиностроение, 1990. — 336 с.
48. Научно-технический прогресс, безопасность и устойчивое развитие цивилизации / Б. В. Гидаспов, И. И. Кузьмин, Б. М. Ласкин, Р. Г. Азиев // Журн. Всесоюзн. хим. общества им. Д. И. Менделеева. Т. 35. 1990. № 4. С. 9—14.
49. Обновленский П. А., Мусяков Л. А., Чельцов А. В. Системы защиты потенциально опасных процессов химической технологии. — Л.: Химия, 1978. — 224 с.
50. Оксенгендлер Г. И. Химические аварии // Природа. 1992. № 3. С. 31—41.
51. Онищенко В. Я. Классификация и сравнительная оценка факторов риска // Безопасность труда в промышленности. 1995. № 7. С. 23—27.
52. От редколлегии (памяти академика В. А. Легасова). Журн. Всесоюзн. хим. общества им. Д. И. Менделеева. Т. 35. 1990. № 4. С. 403—404.
53. Перелет Р. А., Сергеев Г. С. Технологический риск и обеспечение безопасности производства. — М.: Знание, 1988. — 64 с.
54. Половко А. М., Маликов И. М., Жигарев А. Н., Зарудный В. И. Сборник задач по теории надежности. — М.: Советское радио, 1972. — 408 с.

55. Порфирьев Б. Н. Экологическая экспертиза и риск технологий. — М.: ВИНТИ. Итоги науки и техники. Серия «Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов» 1990. Том 27. — 204 с.
56. Потехин Г. С., Прохоров Н. С., Терещенко Г. Ф. Управление риском в химической промышленности // Журн. Всесоюзн. хим. общества им. Менделеева. Т. 35. 1990. № 4. С. 21—24.
57. Предупреждение крупных аварий: Практическое руководство. Пер. с англ. — М.: МП «Рарог», 1992. — 256 с.
58. Проценко А. Н. Региональная безопасность: концептуальные принципы управления и основные направления их реализации // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 11. М.: 1996. С. 3—26.
59. Риск как точная наука // Наука и жизнь. 1991. № 3. С. 2—5, 59—64.
60. Рыжков Ф. Н., Томаков В. И. Основы теории расчета надежности технических систем: Учебное пособие / Курский государственный технический университет. — Курск, 1998. — 94 с.
61. Рыжков Ф. Н., Томаков В. И. Надежность технических систем и управление риском: Учебное пособие / Курский государственный технический университет. — Курск, 2000. — 346 с.
62. Состояние условий труда, заболеваемости и травматизма на производстве // Безопасность труда в промышленности. 1995. № 11. С. 2—7.
63. Состояние и меры по улучшению условий и охраны труда в Российской Федерации // Безопасность труда в промышленности. 1996. № 8. С. 2—13.
64. Тевлин С. А. Культура безопасности на АЭС (конспект лекций) // Бюллетень центра общественной информации по Атомной энергии. 1997. № 2. С. 18—29; № 3. С. 16—21; № 4. С. 25—31.
65. Томаков В. И. Прогнозирование техногенного риска с помощью «Деревьев отказов»: Учебн. пособие / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1997. — 99 с.
66. Томаков В. И., Томаков М. В. Информационно-аналитическая модель управления техногенным риском. В сборнике «Измерение, контроль, информатизация» / Алтайский государственный технический университет. — Барнаул. С. 202—204.
67. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов: Пер. с англ. / Под ред. Р. И. Журавлева. — М.: 1978. — 411 с.
68. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (20.06.1997 г.) // Гражданская защита. 1997. № 11. С. 68—75.
69. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / Пер. с англ. В. С. Сыромятникова, Г. С. Деминой; Под общ. ред. В. С. Сыромятникова. — М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.

70. Химмельблау Д. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах: Пер. с англ. — Л.: Химия, 1983. — 352 с.
71. Правила Федерального регулирования (название 29-Труд) // Безопасность труда в промышленности. 1994. № 6. С. 55—61.
72. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность / Пер. с англ. Б. А. Чумаченко. — М.—Л.: Энергия, 1966. — 232 с.
73. Хроника наших потерь // Охрана труда и социальное страхование. 1994. № 2. С. 9.
74. Чрезвычайные ситуации: статистика и анализ. Доклад МЧС России за 1993 год // Гражданская защита. 1994. № 3. С. 4—7.
75. Шахрамьян М. А., Ларионов В. И., Нигметов Г. М. и др. Комплексная оценка риска от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Безопасность жизнедеятельности. 2001. № 12. С. 8—14.
76. Мазур И. И. Экология строительства объектов нефтяной и газовой промышленности. — М.: Недра, 1991. — 279 с.
77. Ястребенецкий М. А., Иванова Г. М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 264 с.
78. Фалеев М. И., Легошин А. Д. Международные спасательные операции. Особенности проведения и технологий. — М.: «Аякс Пресс», 2001. — 192 с.

Учебное пособие

Акимов Валерий Александрович,
Лапин Валерий Львович,
Попов Виктор Михайлович,
Пучков Владимир Андреевич,
Томаков Владимир Иванович,
Фалеев Михаил Иванович

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Изд. лиц. ИД № 04384 от 26.03.2001.
Сдано в набор 12.09.2002. Подписано в печать 15.11.2002.
Формат 70×100 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 23,0. Гарнитура «Таймс».
Тираж 1000 экз. Заказ №

Финансовый издательский дом «Деловой экспресс».
125015, Москва, ул. Вятская, д. 27.

Отпечатано с готовых диапозитивов
во ФГУП ИПК «Ульяновский Дом печати»
432980 г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

ISBN 5-89644-078-2

