

65  
Б-435

БАКАЛАВР • МАГИСТР

П. Г. Белов

# УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ,

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Часть 2

УЧЕБНИК и ПРАКТИКУМ



УМО ВО рекомендует  
УМО рекомендует

**Юрайт**  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
biblio-online.ru

П. Г. Белов

# УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ, СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

## Часть 2

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ БАКАЛАВРИАТА И МАГИСТРАТУРЫ

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям и специальностям*

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» (квалификация/степень — магистр)*

Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)



Москва ■ Юрайт ■ 2019

**Автор:**

**Белов Петр Григорьевич** — доктор технических наук, доцент, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Рецензенты:**

*Горский В. Г.* — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института органической химии и технологий;

*Малинецкий Г. Г.* — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом Института прикладной математики РАН имени В. И. Келдыша;

*Переездчиков И. В.* — профессор, доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

**Белов, П. Г.**

Б43 Управление рисками, системный анализ и моделирование. В 3 ч. Часть 2 : учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / П. Г. Белов. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 250 с. — Серия : Бакалавр и магистр. Академический курс.

ISBN 978-5-534-02608-5 (ч. 2)

ISBN 978-5-534-02607-8

В учебнике излагается методология программно-целевого прогнозирования и регулирования рисков, сопутствующего функционированию человекомашинных систем. При этом под риском подразумевается мера опасности, одновременно характеризующая как величину некоторого социально-экономического ущерба, так и вероятность его причинения в конкретных условиях, а для оценки этих двух параметров риска рекомендуются наиболее современные графоаналитические и компьютерные модели.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

*Для преподавателей вузов и студентов магистратуры, обучающихся по направлению специальностей «Техносферная безопасность». Может быть использован специалистами, интересующимися новейшими результатами в области системного исследования и совершенствования менеджмента рисков.*

УДК 614.8(075.8)

ББК 68.9я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-02608-5 (ч. 2)

ISBN 978-5-534-02607-8

© Белов П. Г., 2014

© ООО «Издательство Юрайт», 2019

# Оглавление

## Раздел II. Моделирование и системный анализ процесса прогнозирования параметров риска

<b>Глава 8. Идентификация и предварительный анализ источников риска .....</b>	<b>10</b>
8.1. Концепция выявления и предварительного (качественного) анализа источников риска.....	11
8.2. Методы и обобщенная процедура предварительной оценки параметров риска .....	17
8.3. Представление и использование результатов предварительного анализа риска .....	26
8.4. Аprobация процедуры предварительного анализа и оценки параметров риска.....	31
<i>Вопросы и задания для самопроверки.....</i>	<i>39</i>
<b>Глава 9. Общие принципы прогнозирования риска происшествий .....</b>	<b>41</b>
9.1. Обобщенная процедура системного исследования происшествий с помощью причинно-следственных диаграмм .....	41
9.2. Символика и способы задания диаграмм причинно-следственных связей .....	47
9.3. Классификация и краткая характеристика основных типов диаграмм влияния .....	50
9.4. Автоматизированное прогнозирование параметров риска с помощью схем функциональной целостности.....	58
<i>Вопросы и задания для самопроверки.....</i>	<i>67</i>
<b>Глава 10. Системное прогнозирование параметров риска происшествий с помощью диаграмм типа «дерево»... 68</b>	<b>68</b>
10.1. Правила построения диаграмм типа «дерево происшествия» и «дерево событий» .....	68
10.2. Качественный анализ моделей типа «дерево» .....	73
10.3. Количественный анализ диаграмм типа «дерево»... 79	79

10.4. Иллюстративные модели прогнозирования риска с помощью диаграмм типа «дерево» .....	84
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	100
<b>Глава 11. Моделирование и прогноз параметров риска происшествий с помощью диаграмм типа «граф» .....</b>	<b>102</b>
11.1. Моделирование происшествий с помощью потокового графа .....	102
11.2. Разработка аналитической модели, эквивалентной потоковому графу.....	105
11.3. Обоснование и системный анализ результатов графо-аналитического моделирования.....	111
11.4. Методика априорной оценки риска происшествий на объекте повышенной опасности .....	117
11.5. Граф-модель возникновения происшествия на транспорте.....	122
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	126
<b>Глава 12. Моделирование и прогноз параметров риска происшествий с помощью диаграмм типа «сеть» .....</b>	<b>128</b>
12.1. Принципы построения и системного анализа сетей стохастической структуры .....	128
12.2. Оценка параметров опасных событий количественным анализом сети GERT .....	133
12.3. Логико-лингвистическая модель происшествия в человекомашинной системе .....	136
12.4. Алгоритм имитационного моделирования процесса появления происшествий на основе сети GERT .....	143
12.5. Прогнозирование вероятности происшествий методом имитационного моделирования.....	151
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	159
<b>Глава 13. Общие принципы исследования процесса причинения ущерба.....</b>	<b>161</b>
13.1. Сущность и краткая характеристика процессов причинения и оценки ущерба от происшествий... ..	162
13.2. Общие принципы прогнозирования и оценивания параметров нежелательного проявления источника риска .....	167
13.3. Обобщенная методика прогнозирования ожидаемого на объекте повышенной опасности среднего ущерба.....	174
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	183

<b>Глава 14. Прогнозирование параметров аварийного истечения и распространения энергозапаса.....</b>	<b>185</b>
14.1. Особенности прогнозирования параметров неконтролируемого истечения и распространения потоков энергии и вредного вещества .....	185
14.2. Краткая характеристика моделей и методов прогнозирования параметров неуправляемого распространения аварийно высвободившегося энергозапаса.....	191
14.3. Обзор моделей и методов прогнозирования зон неуправляемого распространения выбросов вредного вещества.....	196
14.4. Обобщенный подход к прогнозированию параметров распространения и рассеяния вредного вещества .....	202
14.5. Прогнозирование пятен и полей концентрации вредного вещества.....	207
14.6. Особенности прогнозирования параметров полей концентрации в наиболее типичных ситуациях .....	211
<i>Вопросы и задания для самопроверки.....</i>	<i>215</i>
<b>Глава 15. Прогнозирование параметров превращения и разрушительного воздействия продуктов аварийного выброса.....</b>	<b>217</b>
15.1. Особенности прогнозирования параметров превращения и поражающего действия аварийного высвободившегося энергозапаса.....	217
15.2. Модели и методы априорной оценки параметров процесса причинения техногенного ущерба .....	224
15.3. Аprobация методов прогнозирования ущерба от возможных происшествий .....	232
15.4. Особенности прогноза ущерба здоровью людей от воздействия вредных химических веществ.....	239
15.5. Особенности оценки экономического ущерба от воздействия опасных факторов на объекты фауны и флоры .....	243
<i>Вопросы и задания для самопроверки.....</i>	<i>246</i>
<b>Литература .....</b>	<b>248</b>

РАЗДЕЛ

---

# II

**Моделирование  
и системный  
анализ процесса  
прогнозирования  
параметров риска**

В результате усвоения материала данного раздела студенты должны:

**знать**

- методологию графо-аналитического моделирования процесса возникновения происшествий в человекомашинных системах и технологию ручного и автоматизированного количественного анализа соответствующих моделей с целью априорной оценки не только вероятности и ущерба от рассматриваемых аварий, катастроф и несчастных случаев, но и величины того снижения этих параметров риска, которое ожидается от внедрения альтернативных мероприятий и знание которого необходимо для принятия рациональных решений в риск-менеджменте;

**уметь**

- определять тип наиболее подходящей модели и создавать ее структуру таким образом, чтобы она не только учитывала все самые существенные факторы исследуемого происшествия, задаваемые минимально необходимым числом доступных и достоверных сведений о рассматриваемой человеко-машинной системе, но также была пригодна для последующего системного (качественного и количественного) анализа с целью прогноза параметров соответствующего риска и количественной оценки вклада в них каждого учтенного фактора;

**владеть**

- современными методиками ручного и автоматизированного количественного анализа создаваемых и стандартных моделей процессов появления наиболее тяжелых и (или) распространенных происшествий в человеко-машинных системах;

- навыками уверенного применения современных компьютерных средств, общепринятых количественных показателей риска и критериев оценки эффективности решений по парированию всех его доминирующих факторов.

---



# **Идентификация и предварительный анализ источников риска**

Изложение материала второго раздела книги целесообразно начать со знакомства с основными методами идентификации источников риска, а также с теми процедурами предварительной оценки его значимости, которые описывают все учитываемые ими факторы и показатели на качественном и полуколичественном уровнях. Данный этап выявления и оценивания риска должен проводиться на ранних этапах жизненного цикла объектов повышенной опасности (ОПО), т.е. когда отсутствуют сведения о всех значимых для него параметрах. Вместе с тем усвоение подобных сведений способно не только избавить администрацию объектов от крупных ошибок с выбором принципиальных схем и мест их дислокации, но и указать приоритеты в последующем уточненном (количественном) прогнозе риска.

Данная глава книги иллюстрирует работоспособность и конструктивность рассмотренных в первом разделе теоретико-методологических основ применительно к оценке риска техногенных происшествий на *качественном* уровне. Ее результаты используются затем как исходные данные для *уточненного* прогноза таких показателей риска ОПО, как вероятность наступления подобных неблагоприятных событий и ожидаемый от них средний ущерб. Естественно, что делается это на основе моделирования и системного анализа вначале

процесса появления конкретных техногенных происшествий, а затем и процесса их развития с причинением какого-либо ущерба.

## 8.1. Концепция выявления и предварительного (качественного) анализа источников риска

Как следует из определения риска (см. параграф 6.4), данная интегральная характеристика включает в себе две меры, описывающие и возможность, и результат нежелательного проявления какой-либо опасности. Легко понять, что при создании ОПО эти два показателя могут выражаться лишь на качественном либо полуколичественном уровне — соответственно лингвистическими переменными типа «низкий», «высокий» и в баллах или долях отрезка  $[0; 1]$ . Равно как и то, что устранить на этом этапе любые вскрытые недочеты наиболее дешево.

Вот почему знакомство со способами системного исследования техногенных происшествий целесообразно начать с их подобного анализа. При этом логично вначале определиться с соответствующей концепцией и используемыми терминами, а затем сформулировать цель, задачи и последовательность проведения предварительного анализа, а также продемонстрировать его работоспособность и конструктивность каким-либо правдоподобным примером. Сделаем это последовательно, начиная с раскрытия содержания следующих терминов.

**Идентификация** источников техногенного риска — процесс выявления наиболее опасных технологических операций и технических устройств ОПО, а также обстоятельств, причин и факторов их возможного проявления в форме конкретных техногенных происшествий.

**Ранжирование** источников техногенного риска — составление их перечня в порядке убывания присвоенных им мер возможности и результата нежелательного проявления;

**Мера возможности** — качественный или количественный показатель, характеризующий вероятность или частоту подобного проявления источника техногенного риска в виде лингвистической переменной [26] либо полуколичественной (балльной) оценки.

**Мера результата** — качественный или количественный показатель, отражающий последствия (размер ущерба, время до наступления) техногенного происшествия в форме соответствующих лингвистических переменных или полуколичественных оценок.

Идентификацию источников техногенного риска целесообразно проводить, руководствуясь принятой выше (см. параграф 6.3) *энергоэнтропийной* концепцией. В частности, из нее следует, что технические устройства ОПО, обладающие высоким термодинамическим или электрическим потенциалом, а также вредные и аварийно химиче-

ски опасные вещества (АХОВ) представляют повышенную опасность. Ведь в случае нежелательного высвобождения и неконтролируемого распространения подобного энергозапаса воздействие соответствующих потоков на незащищенные от них объекты из состава людских, материальных и природных ресурсов способно причинить социально-экономический ущерб.

Обеспечение безопасности функционирования подобных объектов техносферы, т.е. снижение техногенного риска до приемлемого уровня, обычно достигается выполнением соответствующих мероприятий. Однако ни вероятность появления каких-либо происшествий на ОПО, ни ожидаемый от них ущерб даже в самом благоприятном случае не могут быть нулевыми. Следовательно, приемлемость сопутствующего техногенного риска должна достигаться осуществлением комплекса *мероприятий*, включающих:

а) идентификацию источников опасностей, причин и признаков их возможного проявления в форме различных техногенных происшествий;

б) априорную оценку показателей, свидетельствующих о мере возможности или частоте возникновения данных случайных событий;

в) априорную оценку показателей, характеризующих меру результата (тяжесть и длительность времени) проявления вредных последствий таких происшествий;

г) предварительную оценку достаточности имеющихся либо дополнительных мер по снижению техногенного риска и обоснование соответствующих предложений;

д) прогнозирование и обработку интегральных показателей техногенного риска с целью принятия решения о его соответствии приемлемым требованиям.

Предлагаемая процедура может быть облегчена заблаговременным делением технологического оборудования ОПО на ограниченное число типов — в соответствии с протекающими физико-химическими процессами и используемыми вредными веществами. Ведь в последующем подобное решение ограничит состав моделей инициирования, возникновения, развития и причинения ущерба от тех фактически однородных техногенных происшествий, которые могут иметь место при эксплуатации оборудования одной категории.

Вот почему в качестве конкретных источников техногенного риска эксплуатируемых ОПО ниже предлагается использовать ответственные технические устройства (ОТУ) — те главные функциональные компоненты промышленных и транспортных объектов, которые могут интерпретироваться в общем случае как человекомашинные системы. Что касается обоснованности модельного представления ОТУ в виде систем «человек — машина — среда», то необходимые для этого доводы были приведены в предыдущих главах. Там же (см., например,

параграф 6.4) даны и рабочие определения всех основных компонентов этих сложных систем, а также их ближнего и дальнего окружения.

Что касается *методологии* предварительной (качественной или полуколичественной) оценки риска, то она должна содержать следующие *способы и этапы* реализации.

1. Идентификация источников и признаков возможного проявления техногенного риска в виде различных аварийных происшествий. Данный этап рекомендуется выполнять, основываясь на следующих закономерностях возникновения и нежелательного проявления объективно существующих опасностей: а) наличие источников техногенного риска обусловлено нахождением ОТУ в термодинамически неравновесном состоянии, а значения меры результата их проявления растут по мере накопления запасов обрабатываемой энергии или вредного вещества; б) возникновение техногенных происшествий следует рассматривать и как начало аварийного выброса подобного энергозапаса, и как следствие образования причинной цепи предпосылок (ПЦП), состоящей из ошибок людей, отказов техники и нерасчетных (превышающих допустимые пределы или неожиданных) внешних воздействий.

2. Выявление совокупности иницирующих факторов-предпосылок к аварийному выбросу энергозапаса ОТУ и прогнозирование наиболее вероятных сценариев (исходов его последующего неконтролируемого истечения, распространения, превращения и разрушительного воздействия) с причинением возможного ущерба. Эту часть процедуры рекомендуется проводить в соответствии с логикой, графически представленной на рис. 8.1.

Данная модель имитирует процесс возникновения и разрушительного развития конкретного техногенного происшествия (аварийного выброса энергозапаса ОТУ) в виде прохождения сигнала от исходных событий левой части к центру диаграммы, а от него — к конечным исходам правой. Прогнозирование же наиболее вероятных причинных цепей и сценариев рекомендуется осуществлять методами дедукции и индукции соответственно.

3. Оценка мер возможности и результата проявления конкретного источника риска в виде техногенного происшествия. При выполнении данного этапа основное внимание следует уделять учету тех препятствий-барьеров на пути распространения только что упомянутого сигнала, которые показаны на рис. 8.2 и которые должны быть предусмотрены проектно-конструкторской и эксплуатационно-технической документацией ОПО. Оценка их достаточности определяется с учетом специфики района его дислокации, значимости выявленных источников риска и статистики аварий на аналогичных объектах.

В этих условиях содержанием упомянутой выше деятельности администрации ОПО должно стать своевременное получение инфор-

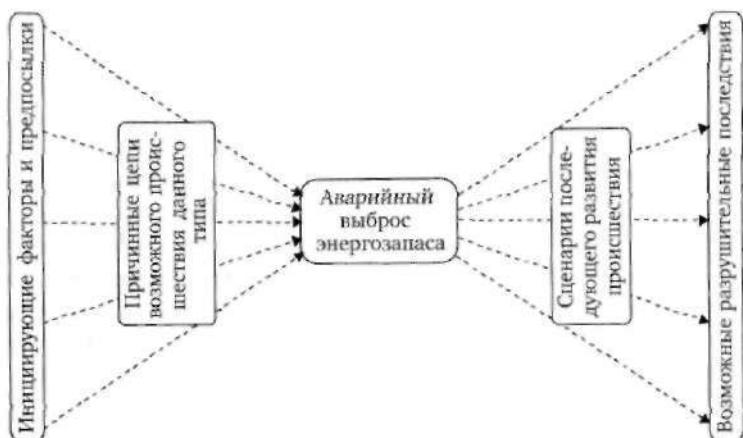


Рис. 8.1. Модель происшествия с выбросом энергозапаса

мации о причинах и признаках возможного проявления источников техногенного риска, а также ее возможное использование в следующих целях:

1) оценка соответствующего вклада разных частей конкретных ОТУ с целью обнаружения узких мест с точки зрения обеспечения безопасности их функционирования;

2) прогноз меры возможности и меры результата проявления вскрытых источников техногенного риска, а также оценка достаточности мероприятий, необходимых для его снижения при эксплуатации конкретных ОТУ;

3) обоснование наиболее результативных стратегий обеспечения безопасности функционирования ОПО в целом, а также оптимизация соответствующих управляющих воздействий.

Отметим также, что предварительный анализ техногенного риска представляет собой лишь начальный этап той деятельности администрации ОПО, которая затем будет связана с его прогнозированием и регулированием. Поэтому главной целью излагаемой здесь процедуры является представление информации, необходимой для последующего решения таких основных задач риск-менеджмента техногенных происшествий:

1) мониторинг технического состояния функциональных подсистем ОПО на предмет своевременного выявления узких мест в их конструкции и технологии эксплуатации;

2) оценка эффективности и целесообразности внедрения дополнительных мероприятий по уменьшению риска техногенных происшествий в процессе эксплуатации каждого ОТУ;

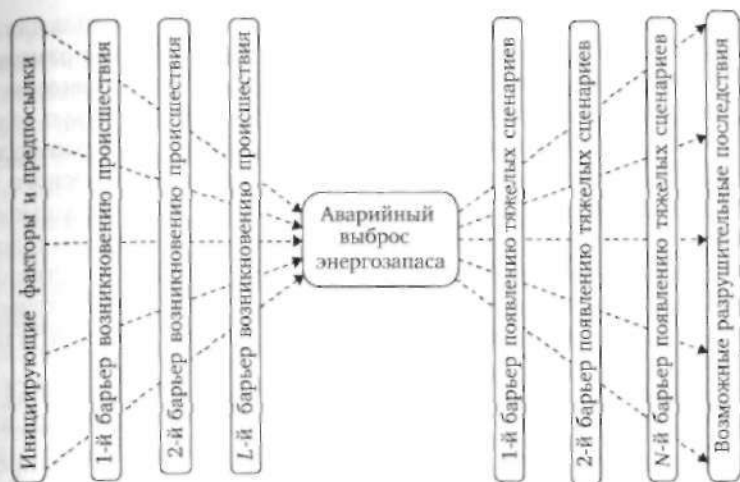


Рис. 8.2. Логика учета барьеров при оценке риска конкретного происшествия

3) выработка оптимальных управленческих решений, учитывающих особенности технического состояния ОТУ и направленных на снижение меры возможности появления техногенных происшествий при ограниченных затратах на внедрение соответствующих мероприятий и уменьшение данного показателя техногенного риска до приемлемого уровня путем внедрения мероприятий, требующих минимальных затрат.

Предварительная оценка мер возможности и результата проявления источников техногенного риска на ОПО должна осуществляться рабочими группами, формируемыми их администрацией и включающими специалистов по надежности технических систем, охране труда и технике безопасности, пожарному, технологическому и энергетическому надзору. Для проведения дополнительных исследований и оказания аудиторской помощи могут привлекаться специализированные организации. Возглавлять же рабочую группу должен главный инженер ОПО или его заместитель, отвечающий за обеспечение промышленной и экологической безопасности.

Особое внимание при подборе рабочей группы и привлекаемых специалистов следует обращать на их способность:

а) выявлять те факторы, которые считаются существенными для возникновения техногенных происшествий и оценки частот появления иницирующих их событий-предпосылок;

б) излагать аргументированные суждения относительно величины соответствующего ущерба и времени до его наступления;

в) предлагать конкретные мероприятия по снижению техногенного риска и оценивать их предполагаемую результативность.

Основным источником исходных данных, необходимых для осуществления предварительной оценки и снижения риска возможных на ОПО происшествий, являются проектно-технологическая и эксплуатационно-техническая документация на все ОТУ, отчеты о результатах периодического освидетельствования, проверок и технического диагностирования входящих в них объектов технологического надзора, средств измерений и других наиболее ответственных элементов, а также экспертные суждения специалистов рабочей группы и достоверные статистические данные по аналогичным производственным объектам, технологическим процессам и оборудованию. Получаемая при этом информация должна касаться следующих сведений и целевого предназначения.

1. Дислокация ОПО и характеристика окружающей среды: взаимное расположение данного объекта техносферы и особо ответственных потребителей его продукции; средняя плотность людей, проживающих и пребывающих в ближайших населенных пунктах; климатические, ландшафтные, сейсмические и топографические условия района их расположения и т.п. Эти данные служат входными параметрами как для процедуры оценки риска (например, сейсмическая обстановка позволяет судить о возможности неблагоприятных внешних воздействий на ОТУ), так и для его обработки<sup>1</sup> (чаще всего — для обоснования мер по снижению тяжести последствий или перераспределения риска наиболее тяжелых техногенных происшествий, например, путем страхования).

2. Состав и свойства ОПО: характеристика помещений и производственного оборудования с указанием расположения и габаритных параметров; данные о технологических процессах и обращающихся в них вредных веществах; сведения, характеризующие техническое состояние используемого оборудования (структурные схемы надежности, интенсивности отказов их элементов, свойства конструкционных материалов, имеющиеся дефекты и т.д.); численность и размещение персонала на территории и в помещениях. Указанные сведения требуются для идентификации источников техногенного риска и признаков их возможного проявления, определения вероятных сценариев развития возможных происшествий и оценки их частоты, идентификации вторичных поражающих факторов и степени их влияния на соседние с ОТУ технологические установки, а также для определения меры возможности и параметров эскалации наиболее крупных катастроф и аварий на ОПО.

3. Техничко-экономические и справочные данные, непосредственно относящиеся к предупреждению и смягчению последствий техноген-

<sup>1</sup> Обработка риска согласно ГОСТ Р 51897—2002. Менеджмент риска. Термины и определения — это процесс выбора и осуществления мер по модификации (избеганию, оптимизации, переносу или сохранению) риска.

ных происшествий на конкретном ОТУ: системы контроля загазованности, предназначенные для выявления утечек горючих веществ и инициаторов их возможного воспламенения; наличие и состояние средств пожаротушения (пожарных насосов, пожарных трубопроводов и огнетушителей); совершенство гражданской защиты и обороны (оснащенность сооружений и персонала путями эвакуации, средствами от проникновения сторонних лиц и ведения различных аварийно-спасательных работ); сведения о других защитных мерах и времени реагирования на инциденты, а также о стоимости каждой единицы оборудования ОПО и тяжести техногенных происшествий на аналогичных объектах.

Основными *результатами* предварительного анализа техногенного риска эксплуатируемых ОПО являются качественные показатели, характеризующие наличие и серьезность не только соответствующих источников, но и предпосылок к техногенным происшествиям, а также меры возможности и последствия их возникновения с учетом организационно-технических мероприятий по предупреждению и снижению ущерба — как уже реализованных, так и предлагаемых рабочей группой для снижения техногенного риска.

## **8.2. Методы и обобщенная процедура предварительной оценки параметров риска**

После обоснования порядка предварительного анализа техногенного риска целесообразно уточнить основные способы идентификации и ранжирования соответствующих источников — в смысле оценки их вклада в появление техногенных происшествий на ОПО. При этом должное внимание нужно уделить также разработке технологии, пригодной для качественной оценки не только мер возможности и результата проявления источников техногенного риска, но и достаточности существующих и предлагаемых мер по его снижению.

С учетом накопленного ныне передового опыта риск-менеджмента и необходимости его распространения на современных энергоемких ОПО для априорной оценки качественных показателей, характеризующих вероятность и последствия техногенных происшествий при эксплуатации их конкретных ОТУ, ниже рекомендуются следующие основные *методы* и базирующаяся на них процедура проведения соответствующей практической работы.

1. Идентификация источников техногенного риска конкретных ОТУ и признаков его наиболее вероятного проявления при их функционировании проводится с помощью таких основных методов (см. табл. 7.1), как: а) «Что будет, если...?»; б) анализ опасности и работо



способности; в) анализ вида и последствий отказа; г) оценка надежности человеческого фактора.

2. Ранжирование выявленных источников осуществляется этими же способами с учетом особенностей функциональных подсистем ОПО и реализуемых в них технологических процессов, а также с помощью достоверных статистических данных по аналогам.

3. Оценка показателей, характеризующих меру возможности и меру результата проявления источников техногенного риска, проводится путем обработки экспертных суждений, с использованием универсальной шкалы базовых балльных, лингвистических и численных оценок, содержание которых приведено в табл. 8.1.

Обеспечить однозначность восприятия предложенных балльных, лингвистических и численных (на отрезке  $[0; 1]$ ) оценок риска экспертами рабочей группы, а также установить однозначное соотношение между такими оценками и единицами физических величин предлагается с помощью таблиц, подобных табл. В.5, приведенной в приложении к настоящей книге. Имеющиеся там соотношения получены делением диапазонов реально возможных на ОПО изменений абсолютных значений каждого показателя на десять частей и последующим округлением полученных при этом величин до десятой доли единицы.

Таблица 8.1. Универсальная шкала оценок параметров техногенного риска

Балл	Лингвистическое значение оценок параметра			Число
	Мера возможности	Мера результата		
		размеры ущерба	время до проявления	
	Совершенно невозможно	Очень очень низкий	Бесконечно долго	0,0
5	Практически невозможно	Очень низкий	Почти бесконечно долго	0,1
3	Допустимо, но маловероятно	Низкий	Исключительно медленно	0,2
4	Отдаленно возможно	Ниже среднего	Очень медленно	0,3
	Необычно, но возможно	Средний	Медленно	0,4
3	Неопределенно возможно	Выше среднего	Неопределенно быстро	0,5
	Практически возможно	Серьезный	Быстро	0,6
2	Вполне возможно	Очень серьезный	Очень быстро	0,7
	Наиболее возможно	Высокий	Исключительно быстро	0,8
1	Достоверно возможно	Очень высокий	Почти мгновенно	0,9
	Абсолютно достоверно	Очень очень высокий	Практически мгновенно	1,0

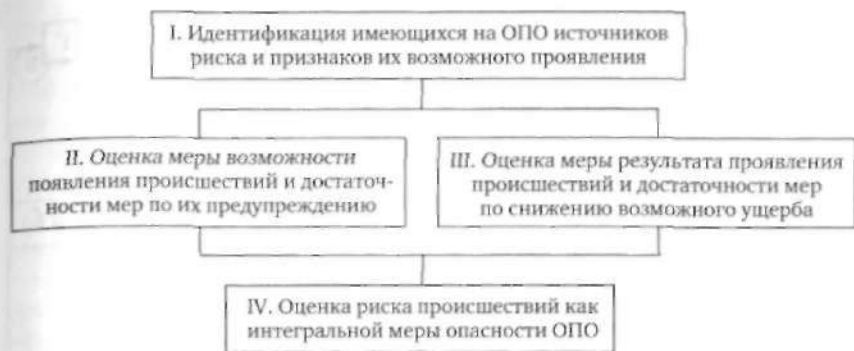


Рис. 8.3. Этапы предварительной оценки и обработки параметров риска

Рекомендуемая здесь обобщенная процедура предварительного анализа, обычно осуществляемого по завершении эскизного проектирования создаваемого ОПО, включает четыре крупных этапа, представленных на рис. 8.3 в виде соответствующей блок-схемы и выполняемых в порядке имеющейся нумерации. Кратко поясним все эти этапы.

I. Реализацию *первого* этапа нужно проводить последовательно, декомпозируя исследуемый ОПО на ОТУ, а каждое из них — на изделия и узлы, ответственные за производство, транспортировку, переработку, хранение и потребление используемых аварийно опасных и вредных веществ или энергии следующего вида: механическая — движущихся тел; потенциальная — сжатых газов и поднятых предметов; тепловая — криогенных и перегретых веществ; химическая — вредных и токсичных материалов; электрическая — токоведущих частей, находящихся под высоким напряжением. Рекомендуемая очередность показана на рис. 8.4.

Особое внимание при выполнении данного этапа следует уделять выявлению и учету на ОПО тех критических отказов, возникновение каждого из которых достаточно для аварийного высвобождения большого количества имеющегося там энергозапаса. Подобные отказы могут быть обусловлены либо конструктивно-производственными недостатками и иными дефектами ОТУ, либо нерасчетными для него внешними воздействиями со стороны окружающей среды, включая ошибочные и несанкционированные действия людей. Первое место в формируемом перечне должны занимать критические отказы следующих узлов и элементов, входящих в состав ОТУ и имеющихся в составе большинства объектов промышленности и транспорта:

а) резервуары хранения и перевозки аварийно опасных и вредных веществ — обечайки подобных емкостей и их сварные соединения

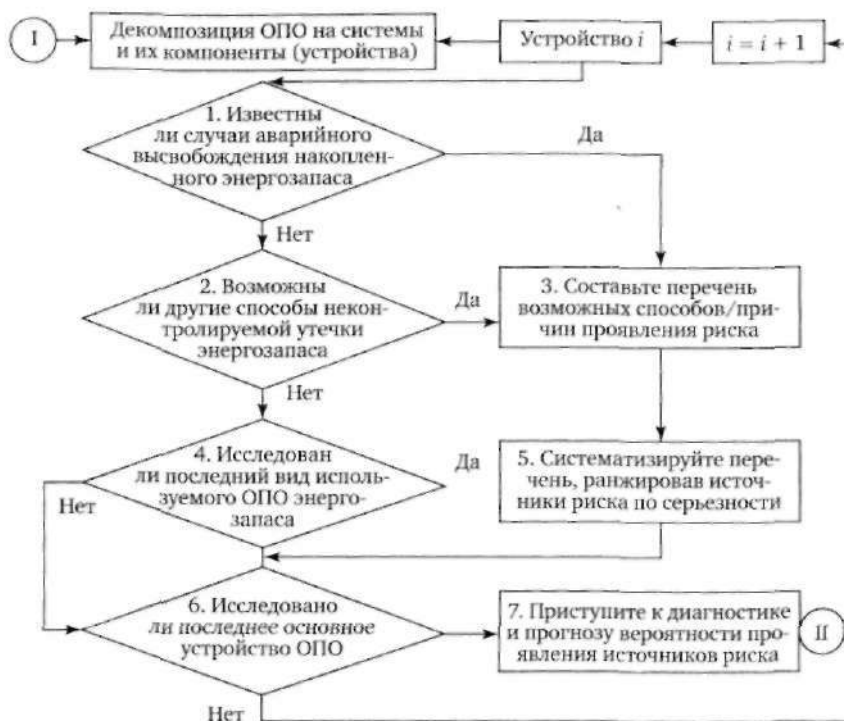


Рис. 8.4. Идентификации источников риска и способов их проявления

с нижним и верхним днищами, а также места крепления и установки входных и выходных трубопроводов или иных коммуникаций;

б) баллоны и сосуды высокого давления — обечайки цилиндрической части и другие гнутые поверхности, сварные соединения между ними и в местах установки коммуникаций, узлы крепления и опорно-подвесные устройства;

в) трубопроводы и другие коммуникации — обечайки прямых труб и гнутых элементов, сварные соединения и опорно-подвесные устройства;

г) турбокомпрессорные установки — роторы компрессора и турбины, насадные диски и рабочие лопатки ее последних ступеней, подшипники и регулирующие клапаны;

д) турбоэлектрогенераторы — роторы турбины и электрогенератора, обмотки бандажа и возбуждения, подшипники и щеточно-контактный аппарат.

II. Цель второго этапа должна состоять в лингвистической или полуколичественной оценке меры возможности нежелательного проявления каждого идентифицированного источника риска в виде



Рис. 8.5. Прогнозирование меры возможности проявления источника риска

конкретного техногенного происшествия. Делать это рекомендуется путем поиска признаков, указывающих на соответствующую принципиальную возможность, и в последовательности, проиллюстрированной с помощью рис. 8.5.

Соответствующий экспертный анализ конструкторско-технологической документации ОПО нужно проводить последовательно, начиная с проверки полноты соблюдения технических условий на проектирование и изготовление тех узлов и элементов ОТУ, перечень которых был приведен выше. В последующем данные составные части следует относить к категории высокозначимых конструктивных узлов, т.е. приносящих наибольший вклад в условия появления техногенного происшествия. Обычно в их число включают самые нагруженные из-за концентрации напряжений и (или) часто повреждаемые элементы ОТУ, а потому и представляющие наибольшую опасность в процессе последующей эксплуатации ОПО.

Только что упомянутые элементы и зоны рекомендуется устанавливать на основании опыта использования аналогичного технологического оборудования, а также дедуктивного метода, руководствуясь при этом результатами оценки напряженного состояния конструкционных материалов и проектных режимов эксплуатации конкретных ОТУ. Помимо отказа подобных критически важных частей по внутренним причинам, на данном этапе необходимо учитывать также воз-

возможность возникновения других предпосылок к аварийному выбросу энергозапаса, например вследствие появления соответствующих ошибок персонала и нерасчетных для него и техники ОПО внешних воздействий. Поэтому его конструкция должна иметь блокировку или физическую защиту от этих факторов, а их наличие должно учитываться при принятии решения о мере возможности возникновения подобных предпосылок.

Параллельно с идентификацией обстоятельств возникновения на ОПО подобных признаков-предпосылок к нежелательному проявлению источников техногенного риска необходимо оценивать *достоинство* тех конструкторско-технологических и эксплуатационно-технических мероприятий, которые предусмотрены для исключения техногенных происшествий либо дополнительно предлагаются для последующего внедрения. Определение результирующей меры возможности возникновения всех выявленных выше предпосылок каждого типа и обусловленных ими аварийных выбросов энергозапаса ОТУ целесообразно проводить исходя из имеющихся статистических данных и с помощью метода экспертных оценок. Подобным способом следует прогнозировать также снижение значений этих показателей, ожидаемое от мероприятий — как уже реализованных на ОПО, так и предлагаемых для внедрения.

III. Последовательность проведения *третьего* этапа рассматриваемой здесь процедуры и его связь с другими частями показана на рис. 8.6 в виде алгоритмической пошаговой модели, сходной с предыдущими. В качестве ее основы здесь использован четырехстадийный процесс последующего развития тех техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС), которые вызваны разрушением или существенной разгерметизацией ОТУ, содержащего значительные энергозапасы.

Четыре группы ромбовидных фигур соответствуют следующим стадиям возможного развития техногенного происшествия с аварийным выбросом какого-либо аварийно опасного или вредного вещества:

- а) его истечение через поврежденную часть емкости;
- б) распространение объема утечки в окружающем пространстве;
- в) возможное воспламенение или взрыв образовавшейся при этом топливовоздушной смеси (ТВС);
- г) разрушительное воздействие сопутствующих опасных факторов на незащищенные от них объекты из состава людских, материальных и природных ресурсов.

Конструктивность подобной декомпозиции подтверждается возможностью упорядочения процедуры качественного анализа риска.

Прогнозирование характера развития *первой* стадии подобных техногенных происшествий рекомендуется осуществлять дедуктивно-индуктивными методами и с учетом опыта расследования аналогичных техногенных происшествий. При этом следует ограничиться пред-

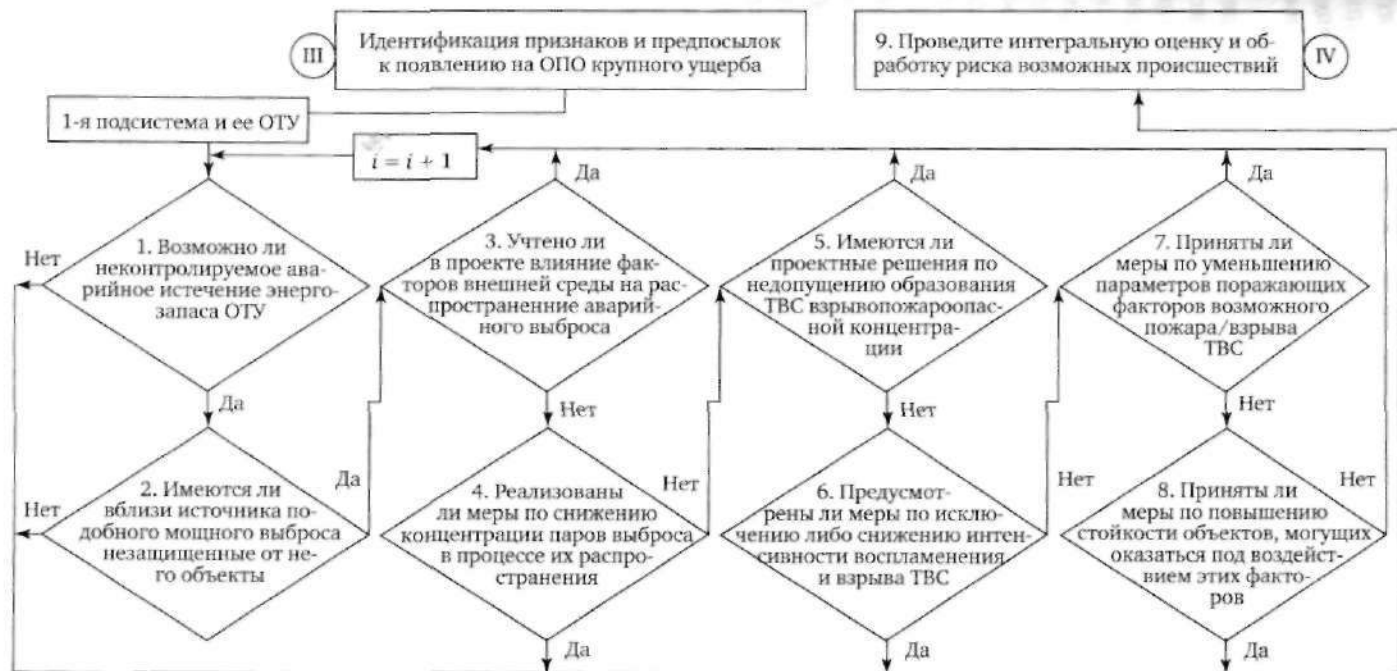


Рис. 8.6. Прогнозирование меры результата проявления источника риска

варительным анализом лишь самого опасного и наиболее вероятного сценариев; меру возможности их наступления и объемы аварийно высвободившихся веществ определять методом экспертных оценок; полученные при этом показатели выражать в лингвистических и соответствующих им относительных числовых величинах.

Предварительную оценку характеристик *второй* стадии следует проводить, руководствуясь соответствующими статистическими данными, а также результатами, полученными путем анализа хорошо зарекомендовавших себя моделей энергомассопереноса. Необходимые для этого сведения могут быть взяты из той части проекта ОПО, которая характеризует взаимное расположение всех ОТУ, насыщенность их окружения потенциально повреждаемыми объектами, розу ветров или направленность течений водоема, а также другие природно-климатические особенности дислокации конкретных объектов и их ближайшего окружения.

Предназначение *третьей* стадии предварительного анализа происшествия с выбросом аварийно опасного или вредного вещества состоит в оценке следующих характеристик: а) возможность образования облака ТВС токсичной или взрывопожарной концентрации; б) наличие условий для его последующего воспламенения или взрыва под воздействием какого-либо инициатора; в) состав образовавшихся при этом поражающих факторов; г) характер их изменения в пространстве и времени. Ожидаемые при этом последствия рекомендуется оценивать, руководствуясь дедуктивно-индуктивными методами, а необходимые для этого исходные закономерности и предпосылки — определять по документации ОПО и результатам статистической обработки данных по подобным авариям.

Прогнозирование характеристик *заключительной* стадии (вероятность токсического поражения, пожара или взрыва ТВС, размеры их опасных зон и время их существования) следует осуществлять методом экспертных оценок, руководствуясь эмпирическими данными и результатами анализа соответствующих моделей. Необходимыми для этого исходными данными должны служить оценки, сделанные на предыдущей стадии рассматриваемого процесса, а также проектные или статистические параметры уязвимости конкретных объектов. Использование этих сведений вместе с поглощенными дозами поражающих факторов и критериями уязвимости позволит оценить как форму ожидаемого от происшествия разрушительного эффекта (уничтожение, повреждение), так и меру возможности его проявления в период эксплуатации каждого ОТУ.

Параллельно с прогнозом последствий всех этапов аварийного выброса опасного или вредного вещества целесообразно оценивать *достаточность* организационно-технических мероприятий по снижению техногенного ущерба — как уже предусмотренных для каждого

ОТУ, так и предлагаемых для внедрения в ходе последующей доработки их конструкции и (или) технологии эксплуатации. Основное внимание при подготовке дополнительных мероприятий должно быть уделено:

а) снижению количества аварийно высвобождающегося энергозапаса, а также концентрации и объема образуемых им токсичных паров и ТВС;

б) уменьшению размеров зон поражения продуктами дефлаграции/детонации подобных смесей;

в) ограничению числа могущих оказаться там объектов или увеличению их стойкости к воздействию опасных и вредных факторов;

г) своевременному оповещению людей о возникновении аварийного выброса и их оперативной эвакуации из опасных зон;

д) заблаговременной подготовке персонала ОПО к действиям в условиях возникшей чрезвычайной ситуации с целью смягчения ее возможных негативных последствий.

IV. На четвертом этапе должна осуществляться оценка интегрального риска эксплуатации конкретного ОПО для каждого его ОТУ и каждого соответствующего источника с учетом предполагаемой эффективности всех конструкторско-технологических и эксплуатационно-технических мероприятий, направленных на предупреждение и снижение тяжести возможных происшествий с аварийным выбросом энергозапаса. Ожидаемый от подобных мероприятий эффект должен оцениваться на всех стадиях появления и развития конкретного техногенного происшествия на основе экспертных суждений. При определении соответствующих оценок необходимо опираться на дедуктивно-индуктивные методы, а в качестве базовых закономерностей и иных исходных сведений — использовать результаты, полученные при обработке известных эмпирических данных и исследовании аварийного риска путем моделирования. Сочетание подобных методов и информации позволяет получать более достоверные прогнозы благодаря возможности воспроизвести логику рассуждений каждого эксперта, а значит, и перепроверить сделанные им оценки не только величины техногенного риска, но и достаточности мероприятий по его поддержанию на приемлемом уровне.

Что касается возможных организационно-технических мероприятий, направленных на снижение риска конкретного техногенного происшествия, то они могут осуществляться на всех учитываемых здесь стадиях его появления и развития с причинением ущерба. Их предполагаемая эффективность на данном этапе анализа риска должна оцениваться с помощью метода экспертных оценок и каких-либо детерминистских критериев. Идея такой оценки проиллюстрирована на рис. 8.7 применительно к принятию решения относительно приемлемости техногенного риска по тем результатам его предварительной



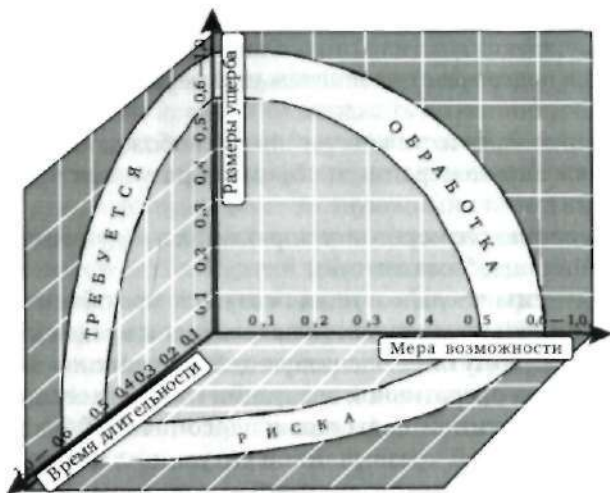


Рис. 8.7. Пространство параметров и критериев оценки техногенного риска

оценки, которые могут быть получены по завершении рассмотренной здесь процедуры.

Как следует из этого рисунка, в данном случае используются те сведения табл. 8.1, которые касаются всех трех полуколичественных (на интервале [0; 1]) мер, характеризующих возможность проявления источников техногенного риска и ожидаемые от него последствия (размеры ущерба, время до его причинения). При этом соответствующее фазовое пространство поделено на три сегмента: 1) область приемлемых оценок риска, расположенная вблизи начала координат; 2) сегмент, требующий регулирования (обработки) параметров риска и простирающийся от оценок 0,5 («неопределенно возможно», «выше среднего», «неопределенно быстро») до 0,6 («практически возможно», «серьезно», «быстро»); 3) область неприемлемого риска, находящаяся вдали от начала координат и определяемая оценками тех его параметров для отдельного ОТУ или ОПО в целом, которые превышают последние три значения.

### 8.3. Представление и использование результатов предварительного анализа риска

Результаты предварительной оценки техногенного риска, сопутствующего эксплуатации конкретного ОПО, могут оформляться отчетом, утверждаемым генеральным конструктором проекта либо руководителем соответствующего промышленного или транспортного предприятия и включающим следующие основные разделы и данные: титуль-

ный лист, список исполнителей, аннотацию и название разделов; наименования ОТУ, цель и основные задачи оценки техногенного риска; применяемые исходные данные, показатели и методы их определения; перечень выявленных источников, причин и признаков возможных техногенных происшествий; лингвистические или балльные значения их мер возможности и результата; выводы о степени достаточности существующих организационно-технических мероприятий по снижению техногенного риска; рекомендации по внедрению дополнительных мер и срокам его очередной оценки, другие предложения и указания.

Полученные при анализе сведения по источникам техногенного риска рекомендуется оформлять в виде различных таблиц и с использованием векторной графики, облегчающей последующее сравнение опасности различных ОТУ и сопоставление оцененных для них показателей риска с приемлемыми для администрации ОПО значениями. При этом в число первопричин появления возможных там техногенных происшествий рекомендуется включать следующие типовые предпосылки и обусловившие их факторы:

- 1) отказы конструктивных элементов — по причинам:
  - а) дефектов проектирования, изготовления, монтажа;
  - б) ускоренного износа и истощения ресурса длительной прочности из-за коррозии, старения, температурных деформаций и усталости металла;
  - в) вредного влияния рабочей среды (агрессивные компоненты, механические перегрузки и повреждения);
- 2) ошибки персонала проектно-технологических и строительно-монтажных организаций ОПО — на стадии:
  - а) восприятия требований нормативно-технической документации (пропуск, искажение или недооценка значимости);
  - б) переработки соответствующей информации (неверно сделанные выводы и решения);
  - в) реагирования на различные ситуации при создании и эксплуатации ОТУ (выполнение непредусмотренных действий и пропуск предписанных, изменение последовательности и технологии выполнения ответственных операций);
- 3) неблагоприятные внешние воздействия — со стороны:
  - а) окружающей ОПО природной среды (аномальные метеорологические условия и природные явления);
  - б) рабочей среды (повышенные уровни вибраций и шума, влажности и температуры воздуха в помещениях);
  - в) несанкционированных действий персонала и третьих лиц (перебои с обеспечением горючим, транспортом и продовольствием, диверсионные акты, саботаж и т.п.).

Перечисленные результаты предварительного анализа риска рекомендуется представлять в виде следующих пяти таблиц, одна из которых заполняется на начальных стадиях эскизного проектирования, а остальные четыре — по его завершении и с учетом результатов, полученных при реализации соответствующих этапов указанной выше процедуры.

В рекомендуемую ниже табл. 8.2 необходимо включать те опасные события, появление которых может быть вызвано неблагоприятными природными процессами и явлениями в районе предполагаемой дислокации ОПО, а также производственно-транспортной деятельностью, уже проводимой и планируемой после его ввода в эксплуатацию. Определение подобных событий и их неблагоприятных последствий должно осуществляться с учетом специфики объекта и опыта использования его аналогов.

**Таблица 8.2.** Результаты предварительного качественного анализа риска

№ ОТУ	Описание опасного события	Возможные последствия	Имеющаяся защита	Рекомендации
-------	---------------------------	-----------------------	------------------	--------------

Следующая табл. 8.3 должна отражать результаты идентификации источников и способов проявления риска, полученные в ходе его качественного анализа в соответствии с рекомендациями предыдущего параграфа (см. рис. 8.4).

**Таблица 8.3.** Источники и способы проявления риска в виде происшествий

Код ОТУ	Наименование подсистемы и (или) ОТУ	Доминирующий в ОТУ энергозапас	Критически важный элемент ОТУ	Критический значимый отказ
---------	-------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	----------------------------

Предлагаемую ниже табл. 8.4 следует заполнять по завершению выполнения рабочей группой той части рекомендованной выше процедуры предварительного анализа техногенного риска, которая непосредственно связана с блок-схемой, изображенной на рис. 8.5.

**Таблица 8.4.** Сведения о возможных происшествиях и их предпосылках

Код ЧС	Наименование происшествия (аварийного выброса энергозапаса) и главной причины его возникновения	Перечень других причин и признаков-дефектов, указывающих на возможность их появления в виде		
		отказа или неисправности высокозначимого элемента	ошибочного либо несанкционированного действия людей	нерасчетного или неблагоприятного воздействия внешней среды

Очередная табл. 8.5 должна заполняться по результатам выполнения этапа процедуры, непосредственно связанного с алгоритмом, который изображен на рис. 8.6.

Таблица 8.5. Сценарии и последствия развития возможных происшествий

Код ЧС	Последствия возможного сценария и признаки-дефекты, указывающие на возможность его проявления на следующих этапах вероятного развития:			
	неконтролируемое истечение энергозапаса ОТУ	его неконтролируемое распространение в новой среде	интенсивное физико-химическое превращение утечки	разрушительное воздействие утечки и опасных факторов их превращения

Представленные подобным образом результаты прогноза техногенных происшествий с аварийным выбросом конкретного энергозапаса следует применять затем для предварительного (качественного или полуколичественного) оценивания *показателей* соответствующего риска. Найденные при этом лингвистические и относительные значения мер возможности и результата проявления соответствующих источников, а также интегральная величина данного риска, получаемая с помощью этих показателей, должны использоваться при заполнении табл. 8.6 и показанного ранее рис. 8.7 с изображением их трехмерного пространства.

Таблица 8.6. Результаты оценки частных и интегральных показателей риска

Код ОТУ	Код ЧС	Мера возможности	Мера результата:		Интегральная оценка риска конкретного происшествия
			мера ущерба	мера длительности	
		$M_x$	$M_y$	$M_z$	$R_x = M_x \cdot M_y / M_z$

Представленная табл. 8.6 должна содержать сведения, полученные в результате качественного анализа источников риска проектируемого ОПО и его предварительной обработки в соответствии с рекомендациями приведенной выше процедуры. Порядок получения и заполнения данных четырех правых колонок этой формы, а также критерии оценки, необходимые для принятия решения о приемлемости риска последующей эксплуатации ОПО, демонстрируются в заключительном параграфе настоящей главы.

Что же касается предпочтительной сферы применения выводов и рекомендаций, полученных при подобном предварительном анализе, то они должны быть использованы в следующих целях:

1) выявление узких (наиболее значимых для проявления источников техногенного риска) мест в конструкции и технологии эксплуатации ОПО и входящих в него ОТУ;

2) выбор рациональных (по критерию «эффективность — затраты») способов поддержания безопасности их функционирования путем усиления или устранения подобных мест;

3) оценка степени соответствия конструкции, технологии и условий эксплуатации ОТУ существующим требованиям промышленной, пожарной и экологической безопасности, охраны труда и природной среды, предупреждения и смягчения чрезвычайных ситуаций;

4) разработка рекомендаций по организации деятельности надзорных органов, совершенствованию инструкций по техническому обслуживанию ОТУ, уточнению планов ликвидации (локализации) возможных на каждом из них аварийных ситуаций;

5) сравнение оцененного техногенного риска эксплуатации ОТУ с установленными критериями его приемлемости, а при их отсутствии — с наиболее благополучными аналогами;

6) принятие решения о необходимости дополнительных организационно-технических и иных мероприятий по совершенствованию безопасности эксплуатации конкретных ОТУ;

7) оценка эффекта от подобных мероприятий, уже реализованных администрацией ОПО в интересах интегрирования риск-менеджмента в общий менеджмент данного объекта.

В состав учитываемых в отчете механизмов/способов разрушительного проявления техногенного происшествия рекомендуется включать:

а) для всех потенциальных жертв — осколочное поражение, повреждение воздушной ударной волной, движущимся предметом или средой, тепловым либо электромагнитным излучением;

б) только для людей — повреждение органов или частей их тела вследствие падения из-за скольжения при ходьбе либо при пользовании лифтом; токсическое или электрическое поражение, удар/захват перемещающимся предметом;

в) для особей животного и растительного мира — уничтожение, понижение жизнестойкости и истощение трофических цепей под воздействием аварийных и непрерывных вредных выбросов ОПО.

В случае использования балльных или числовых (на шкале [0; 1]) показателей меры возможности, размера ущерба и времени до проявления источников техногенного риска оформление соответствующего раздела отчета следует проводить с заполнением предложенной выше табл. 8.6 или фазового пространства (см. рис. 8.7). Последний способ векторного представления результатов оценки и обработки техногенного риска с помощью трех его мер-параметров более нагляден, так как позволяет сравнивать однотипные источники риска одновременно по всем выбранным параметрам и интегральному показателю.

#### 8.4. Аprobация процедуры предварительного анализа и оценки параметров риска

Для подтверждения работоспособности предложенной выше процедуры выбран технологический процесс, осуществляемый на заводе по производству сжиженного природного газа (СПГ) и связанный с перекачкой этого аварийно опасного вещества в изотермические судовые цистерны для последующей транспортировки потребителям. Данный выбор обусловлен возможностью появления тяжелых ЧС, поэтому основное внимание уделено предварительному анализу риска крупного аварийного пролива СПГ вследствие переполнения и разрушения одной из заправляемых цистерн по причине несвоевременного отключения насосной установки отгрузочно-заправочного терминала завода.

Технологическая схема исследуемого опасного процесса, содержащая только значимые для возможного аварийного пролива СПГ элементы оборудования и организационно-технические решения, показана на рис. 8.8.

Согласно регламенту своевременное прекращение заправки СПГ судовой цистерны должно обеспечиваться автоматическим отключением электропитания насосной установки с пульта управления его перекачкой. Необходимая для этого команда могла формироваться по сигналам расходомера и датчика уровня заполняемой емкости либо в случае неисправности электродвигателя (при срабатывании его максимальной токовой защиты). Кроме того, предусматривалась возможность отключения насосной установки оператором пульта управления заправкой, который был обязан постоянно находиться в пультовом помещении отгрузочно-заправочного терминала завода по производству СПГ.

Перечисленные выше особенности рассматриваемого технологического процесса отражены на рис. 8.8 следующими линиями: пунктирной — устройства, критически важные для своевременного прекращения заправки путем выдачи команды; сплошной и проходящей по контуру помещения — цепи питания электронасоса. При этом предполагается, что совместное применение автоматического и ручного способов прекращения перекачки исключает возможность переполнения СПГ в заправляемой судовой цистерне из-за несвоевременной остановки ЭНУ, а обустройство отгрузочно-заправочного терминала средствами локализации пролива, пожаротушения и аварийной сигнализации — воспламенение возможного пролива.

Предварительный анализ риска техногенных происшествий, возможных при проведении рассматриваемого технологического процесса, осуществлен по рекомендациям обобщенной процедуры, в предположении, что аварийный пролив большого количе-

ОБОЗНАЧЕНИЯ

АСПТ — автоматическая система  
пожаротушения;

АВ — автоматический выключатель;

ИЭП — источник электропитания;

ВН — выключатель нагрузки;

ДУ — датчик уровня;

МО — молниеотвод;

МТЗ — максимальная токовая защита;

ПУП — пульт управления  
перекачкой;

РМ — расходомер;

ЭНУ — электродвигатель  
насосной установки

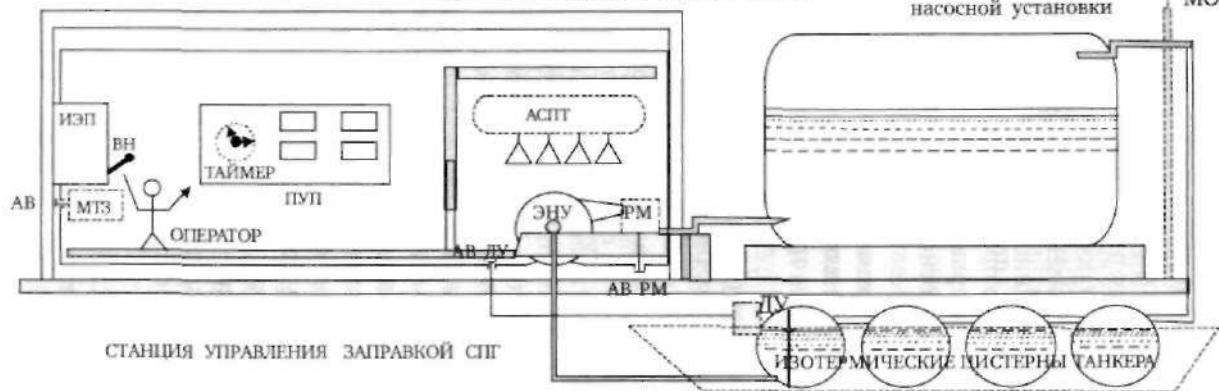


Рис. 8.8. Технология перекачки сжиженного природного газа

ства СПГ мог быть вызван разгерметизацией изотермической судовой цистерны вследствие утраты ее обечайками прочности или конструктивной устойчивости. При этом главной причиной подобного повреждения цистерны считалось превышение избыточного давления в ее внутренней оболочке из-за переполнения СПГ вследствие несвоевременного отключения насосной установки и неспособности закольцованной магистрали (из-за перекрытия дренажно-предохранительного клапана вследствие промерзания) вернуть избытки СПГ обратно в резервуар-хранилище завода. В свою очередь причиной подобного переполнения могла явиться либо невыдача соответствующей команды как автоматически, так и вручную, либо неисполнение уже полученной команды устройством отключения насосной установки.

Приведенные выше предположения сформированы после ознакомления с эксплуатационно-технической документацией на рассматриваемый процесс и участвующие в нем ОТУ заводского отгрузочно-заправочного терминала и заправляемого танкера — перевозчика СПГ. При этом также предполагалась возможность резкого изменения метеорологических условий в ходе проведения заправочных работ в ночное время, например внезапное начало грозы, сопровождающейся мощными разрядами молнии. Все это позволило обнаружить в анализируемой документации ряд дефектов, которые были расценены как признаки, необходимые и достаточные для возможного возникновения и нежелательного развития указанной выше гипотетической ЧС.

В частности, основными из этих дефектов-признаков оказались следующие недоработки, минимально необходимые и достаточные соответственно для:

1) появления предполагаемого аварийного пролива большого количества СПГ:

а) отсутствие в составе отгрузочно-заправочного терминала завода резервного расходомера, используемого системой автоматического отключения ЭНУ в качестве дублера одного из двух ее чувствительных элементов;

б) недостаточно надежная защита от мощных электромагнитных излучений тракта передачи сигнала от датчика уровня СПГ заполняемой судовой цистерны, который исполнял роль второго чувствительного элемента упомянутой выше автоматической системы;

в) отсутствие в инструкции по управлению пультом заправки требования о необходимости заблаговременного отключения насосной установки вручную по истечении заранее установленного (расчетного) времени ее работы;

г) эксплуатационной документацией этого пульта не предусмотрен обязательный контроль действий оператора при ночном проведении заправочных работ, введение которого понизило бы возмож-



ность совершения им ошибочных действий, связанных с неадекватным реагированием на изменение погодных условий и возможными отказами технологического оборудования;

2) нежелательного развития данной техногенной ЧС по наиболее опасному сценарию, чреватому разрушительным каскадным эффектом:

а) внутренняя емкость изотермической судовой цистерны обустроена перегородками, предназначенными лишь для гашения колебаний зеркала СПГ, но не обеспечивающими ее деления на несколько герметичных секций малого объема;

б) конструкционный материал палубы в местах ее сочленения с изотермическими цистернами не рассчитан на криогенное воздействие пролитого СПГ, что чревато возможным трещинообразованием с последующими его утечками во внутренние помещения танкера и образованием там взрывоопасных ТВС;

в) недостаточная взаимная удаленность соседних изотермических цистерн танкера и отсутствие устройств физической защиты их внешней оболочки от разрушительного воздействия длительных интенсивных тепловых потоков возможного там пожара и крупных осколков взрыва;

г) отсутствие в эксплуатационной документации отгрузочно-заправочного терминала требования на обеспечение заправочных работ специальными аварийно-спасательными группами, предназначенными для снижения ущерба от возможных аварийных проливов СПГ.

Результаты только что проведенного предварительного анализа риска техногенного происшествия, возможного при практической реализации выбранного для примера технологического процесса, позволяют приступить к заполнению верхней части всех рекомендованных выше таблиц. В частности, сведения о наиболее вероятном источнике и способе проявления рассматриваемой здесь гипотетической аварии (название ОТУ и энергозапаса, критичных элементов и отказов), а также о наиболее вероятных причинах и признаках возникновения данного нежелательного события представлены в прилагаемых ниже табл. 8.7 и 8.8, которые получены заполнением лишь одной строки уже известных соответствующих табл. 8.3 и 8.4.

**Таблица 8.7.** Источники и способы проявления риска в виде происшествия

Код ОТУ	Наименование подсистемы и (или) ОТУ	Доминирующий в ОТУ энергозапас	Критически важный элемент ОТУ	Критический значимый отказ
1.	Система транспортировки СПГ; цистерна изотермическая судовая	СПГ — криогенное аварийно опасное вещество	Обечайки изотермической цистерны — внутренняя и внешняя	Полное разрушение или значительное повреждение с разгерметизацией

Таблица 8.8. Признаки и обстоятельства формирования ПЦП к происшествию

Код ЧС	Наименование происшествия (аварийного выброса энергозапаса) и главной причины его возникновения	Перечень других причин и признаков-дефектов, указывающих на возможность их появления в виде		
		отказа или неисправности высокозначимого элемента	ошибочного либо несанкционированного действия людей	нерасчетного или неблагоприятного воздействия извне
1.	Пролив большого количества СПГ из-за разрушения судовой изотермической цистерны вследствие ее переполнения по причине несвоевременного прекращения работы насосной установки отгрузочно-заправочного терминала завода по производству СПГ	Неотключение насосной установки автоматической системой управления заправкой из-за появления отказа нерезервированного расходомера и ослабления сигнала от датчика уровня цистерны в незащищенном от помех тракте передачи такого сигнала	Невыдача команды вручную на заблаговременное прекращение заправки СПГ путем оперативного отключения насосной установки оператором по причине его профессиональной непригодности и отсутствия контроля со стороны других лиц завода	Внезапное и резкое ухудшение погоды при ночной перекачке СПГ из заводского резервуара-хранилища в изотермические судовые цистерны, сопровождающееся интенсивным дождем и сильными грозовыми разрядами

Подобным образом получена и табл. 8.9, содержащая результаты поэтапного прогноза последствий возможного развития исследуемой аварии.

Таблица 8.9. Сценарии и последствия развития возможного происшествия

Код ЧС	Последствия возможного сценария и признаки-дефекты, указывающие на возможность его проявления на следующих этапах вероятного развития			
	аварийное истечение энергозапаса ОТУ	его неконтролируемое распространение	физико-химическое превращение утечки	разрушительное воздействие продуктов утечки
1.	Объем аварийно высвободившегося СПГ может оказаться значительным вследствие длительности и интенсивности его истечения, так как внутреннее обустройство судовой изотермической цистерны предназначено для гашения колебаний СПГ, а не герметизации ее отсеков	Вследствие интенсивности аварийного истечения СПГ неиспарившаяся часть пролитой криогенной жидкости будет растекаться по палубным поверхностям, что приведет к их возможному растрескиванию и попаданию СПГ во внутренние отсеки судна	Интенсивное испарение пролитого СПГ приведет к образованию облака ТВС взрывопожарной концентрации, надпалубная часть которого может воспламениться, а подпалубная — взорваться под воздействием внешних источников типа грозового разряда или электроскры	Поражающие факторы возможного пожара/взрыва способны привести к разгерметизации и воспламенению СПГ соседних цистерн вследствие их близкого нахождения и низкой стойкости к длительному воздействию теплового потока и интенсивному — осколков

Значения экспертных (количественных на шкале [0; 1]) оценок риска — мер возможности, ущерба и длительности времени до проявления в виде рассматриваемой здесь гипотетической ЧС с выбросом большого количества СПГ, а также интегральные значения соответствующего показателя, полученные на основе как только лишь анализируемой документации, так и с учетом дополнительно рекомендованных барьеров-препятствий на пути данного аварийного выброса, систематизированы в табл. 8.10.

**Таблица 8.10.** Оценки частных и интегральных показателей техногенного риска

Код ОТУ	Код ЧС	Мера возможности	Мера результата		Интегральная оценка риска гипотетической ЧС
			мера ущерба	мера длительности	
		$M_x$	$M_y$	$M_d$	$R = M_x \cdot M_y / M_d$
Значения показателей проектного риска					
1	1.1	0,60	0,60	0,50	0,72
Показатели риска после обработки с целью снижения возможности появления ЧС					
		0,45	0,60	0,50	
Показатели риска после обработки с целью уменьшения результата появления ЧС					
		0,45	0,40	0,35	
Значения показателей остаточного риска					
1	1.1	0,45	0,40	0,35	$R_o = 0,4$

В верхней половине этой таблицы помещены полуколичественные оценки проектного риска данной техногенной ЧС, а в нижней — после предполагаемого внедрения дополнительных мероприятий-барьеров на пути ее возникновения и развития по каскадному сценарию.

При оценке показателей проектного риска ЧС с проливом большого объема СПГ учитывались следующие основные предположения и факторы:

а) значение меры возможности  $M_x = 0,6$  возникновения данной техногенной ЧС было определено на основе блок-схемы рис. 8.5, а при оценке вероятности возможных предпосылок (отказов, ошибок и неблагоприятных внешних воздействий) учитывались документы, подтверждающие как выполнение требований ИСО-9000, минимизирующих их появление, так и квалификацию соответствующего персонала;

б) величины  $M_y = 0,6$  и  $M_d = 0,5$ , в совокупности определяющие меру результата этой ЧС, оценивались с помощью блок-схемы рис. 8.6 и эксплуатационно-технической документации танкера и отгрузочно-заправочного терминала СПГ, а также результатов расследования

известных техногенных катастроф, вызванных разрушением судовых изотермических цистерн в процессе их заправки этим аварийно опасным веществом;

в) интегральное значение проектного риска рассматриваемой гипотетической ЧС с выбросом большого объема СПГ оказалось в данном случае равным  $R = M_{\text{в}} \cdot M_{\text{у}}/M_{\text{д}} = 0,72$  и в соответствии с принятыми выше критериями (см. рис. 8.7) было признано неприемлемым.

Разработка дополнительных организационно-технических мероприятий по повышению безопасности проведения анализируемого заправочного процесса и определение оценок остаточного риска, полученных после их возможного внедрения, осуществлялась с использованием следующей логики и последовательности экспертных рассуждений.

1. Предложения по снижению меры возможности разгерметизации заполняемой СПГ судовой изотермической цистерны с его последующим аварийным выбросом готовились с учетом рис. 8.5. При этом предлагалось усовершенствовать технологию управления заправкой путем введения дополнительных требований: а) отключение вручную насосной установки после заранее заданного (расчетного) времени ее работы; б) введение обязательного контроля действий оператора соответствующего пульта еще одним специалистом отгрузочно-заправочного терминала. Считалось также, что внедрение этих мероприятий-барьеров на пути возникновения данной ЧС способно понизить прежнее (проектное) значение соответствующей меры возможности до величины  $M_{\text{в}} = 0,45$ .

2. При обосновании рекомендаций по снижению меры результата, ожидаемого от возможного нежелательного развития выбранной для примера гипотетической ЧС, использовался рис. 8.6. В частности, предлагалось уменьшить тяжесть разрушительных последствий каскадного проявления этой аварии и увеличить время до их наступления с помощью следующих двух мер: а) дополнительная термоизоляция части палубы танкера СПГ вблизи судовых изотермических цистерн с целью исключения ее растрескивания, чреватого образованием взрывоопасной ТВС из-за попадания пролитого СПГ во внутренние замкнутые объемы танкера; б) запрет на начало проведения заправки этого аварийно опасного вещества в отсутствие специально созданной аварийно-спасательной группы и без проверки ее готовности к локализации последствий аварийного пролива СПГ, что исключало бы возможность нежелательной эскалации данной ЧС. Предполагалось, что безусловное выполнение этих двух предложений могло уменьшить прежнее значения соответствующих частных мер до величин, соответственно равных  $M_{\text{у}} = 0,40$  и  $M_{\text{д}} = 0,35$ .

3. С учетом результативности, ожидаемой от реализации всех только что перечисленных рекомендаций по повышению безо-

пасности проведения рассматриваемого технологического процесса, интегральное значение остаточного риска оказалось равным  $R_o = M_v \cdot M_y / M_d \approx 0,4$ , что позволило оценить результат, полученный в ходе его предварительной обработки, как удовлетворяющий принятому ранее критерию социально-экономической приемлемости.

Полученные изложенным выше способом оценки частных и интегральных показателей риска гипотетической аварии с высвобождением большого количества СПГ представлены на рис. 8.9: а) интегральные значения — в виде векторов  $R$  и  $R_o$ , соответствующих его первоначальному и остаточному значениям; б) частные параметры, в отдельности характеризующие меры возможности и результата ее наступления, — проекциями этого вектора на каждую ось соответствующего фазового пространства.

Как это следует из сопоставления полученного выше результата с областями допустимых и приемлемых значений техногенного риска, его проектные значения для рассматриваемой техногенной ЧС потребовали предварительной обработки. Тогда как величина остаточного (после реализации дополнительных мероприятий) риска, сопутствующего проведению выбранных для примера заправочных работ на терминале завода по производству СПГ, может расцениваться как удовлетворяющая требованиям приемлемой безопасности.

В завершение данного параграфа и главы в целом отметим *предварительный* характер только что сделанных оценок и выводов. Однако, несмотря на качественный характер сведений, полученных при подобном анализе техногенного риска, они представляются достаточно ценными — в смысле выявления узких мест в деятельности по обеспечению безопасности в техносфере. Вот почему можно утверждать, что

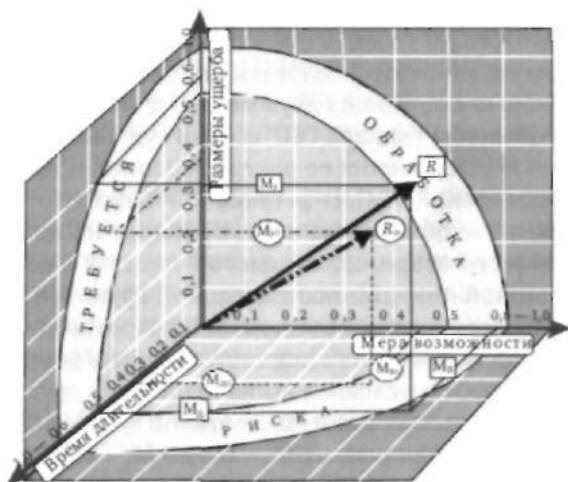


Рис. 8.9. Векторная интерпретация результатов предварительной оценки риска

внедрение в практику предложенной здесь процедуры открывает широкие возможности совершенствования менеджмента техногенного риска и его интеграции в общий менеджмент администрации ОПО.

Естественно, что следующий шаг в данном направлении должен быть связан уже с проведением уточненного (количественного) анализа техногенного риска. Нетрудно догадаться, что решение данной задачи предполагает необходимость в дополнительных моделях и методах системного исследования безопасности в техносфере. Именно этой проблематике, а если точнее — современным подходам к прогнозированию вероятности, а затем и ущерба от техногенных происшествий с помощью диаграмм причинно-следственных связей, а также основанных на них и других математических моделях, посвящены остальные главы этого раздела настоящей книги.

## Вопросы и задания для самопроверки

1. Укажите объект, цель и место предварительного анализа риска техногенных происшествий в риск-менеджменте предприятия.
2. Приведите примеры рассматриваемых при предварительном анализе риска задач применительно к какому-либо объекту техносферы.
3. На основе какой концепции делаются суждения о наличии и степени опасности любого производственного или транспортного объекта?
4. Кто осуществляет идентификацию и ранжирование источников техногенного риска?
5. Какие исходные данные и документы используются при идентификации и ранжировании источников техногенного риска?
6. Перечислите наименования наиболее известных методик, применяемых для предварительной оценки выявленных опасностей.
7. Что служит шкалами и единицами оценки параметров риска на качественном уровне?
8. Перечислите основные этапы обобщенной методики предварительной оценки параметров риска.
9. Укажите принципы выявления основных источников техногенного риска.
10. Что является признаками наличия источников техногенного риска и потенциальной опасности?
11. Каким способом осуществляется оценка меры возможности проявления источников техногенного риска?
12. Перечислите возможные способы снижения меры возможности проявления источников техногенного риска.
13. Как оценивается результат нежелательного проявления источников техногенного риска?
14. С помощью каких показателей прогнозируется возможный разрушительный эффект?

15. По каким признакам можно судить о размерах и времени проявления разрушительного эффекта?
16. Каким путем может быть снижена величина ущерба, связанного с проявлением разрушительного эффекта?
17. Какие способы могут применяться для оттягивания времени проявления разрушительного эффекта?
18. Перечислите типовые мероприятия по смягчению последствий проявления выявленных источников техногенного риска.
19. Каким образом обеспечивается наглядность представления результатов предварительной оценки и ранжирования параметров риска?
20. Укажите критерии приемлемости, применяемые при векторной интерпретации результатов предварительной оценки показателей риска техногенных происшествий.

**Ситуационная задача.** Проведите предварительную оценку риска техногенных происшествий при проведении работ, связанных с выгрузкой из железнодорожного вагона тяжеловесного оборудования и выполняемых с помощью автокрана бригадой из двух человек — крановщика и такелажника.

## Общие принципы прогнозирования риска происшествий

В данной главе излагается обобщенная процедура системного исследования и прогнозирования риска техногенных происшествий. Применяемыми в ней моделями служат причинно-следственные диаграммы типа «граф», «дерево» и «сеть», тогда как их количественный анализ проводится с помощью специализированных компьютерных программ. Полученные при этом знания особенностей и возможностей диаграмм каждого типа *необходимы* для уяснения материала всех остальных глав данного раздела и их корректного применения в будущем.

### 9.1. Обобщенная процедура системного исследования происшествий с помощью причинно-следственных диаграмм

Рассмотрение методов количественного прогноза риска техногенных происшествий и уяснение закономерностей их появления и предупреждения уместно начать с анализа уже накопленного передового опыта и уточнения применяемой концепции. Следуя этому требованию, рассмотрим специфику современных ОПО, а затем изложим особенности практической реализации системного анализа и модели-



рования происшествий как ранее выбранного основного научного метода исследования и совершенствования техносферной безопасности.

Современная производственная деятельность проявляется, как уже ранее указывалось, в использовании человеком «машины» и возникновении связанной с этим возможности причинения ущерба, в том числе для его жизни и здоровья. Поведение людей и техники при совместном функционировании во многом зависит от выбранной технологии и условий рабочей среды. Последняя, в свою очередь, может меняться в результате воздействия на нее двух первых компонентов человекомашиной системы, а степень такого изменения определяется принятой технологией и установленной организацией работ.

Вот почему отклонения в работе технологического оборудования, вызванные конструктивно-производственными дефектами или вредными воздействиями на него извне, необходимо учитывать и компенсировать эксплуатирующему персоналу. Для облегчения решения этой задачи используемое оборудование должно быть надежным и эргономичным, т.е. приспособленным к рабочей среде и человеку. Однако довольно часто приходится приспосабливать к технике сам персонал — за счет соответствующего подбора, обучения и воспитания. Если же взаимное согласование свойств людей и используемого оборудования не гарантирует предупреждения техногенных происшествий, то выход обычно ищут в дополнительных организационно-технических мероприятиях по обеспечению безопасности их совместного функционирования.

Приведенные данные еще раз подтверждают необходимость представления современного производственного объекта как совокупности нескольких функциональных компонентов (ОТУ), интерпретируемых в общем случае в виде человекомашинных систем. Отсюда следуют фактическая невозможность рассмотрения безопасности проводимых технологических процессов в целом и вытекающая из этого целесообразность их декомпозиции на отдельные технологические операции. Такая декомпозиция позволяет отказаться от макроуровневого рассмотрения исследуемого объекта (многочеловекомашиной системы) и заменить его микроуровневым, а взаимное влияние отдельных операций (моносистем «человек — машина — среда») учесть с помощью дополнительных взаимосвязей.

Однако даже декомпозированное представление рассматриваемого объекта, значительно упрощающее его исследование, не отрицает системного подхода, а наоборот — делает его применение более конструктивным. Действительно, представленная ранее модель человекомашиной системы (см. рис. 6.6) подтверждает ее сложность и необходимость признания качественно новым образованием по сравнению с отдельными компонентами и даже с их суммой. Все это позволяет

лучше понять тот факт, что природа каждого из этих компонентов во многом предопределена природой соответствующей системы, а потому они не могут быть познаны вне ее, т.е. без учета всех взаимосвязей и взаимозависимостей.

Помимо подтверждения двух только что упомянутых принципов общей теории систем (см. параграф 4.4) перечисленными выше особенностями поведения исследуемого объекта, можно продемонстрировать также *соответствие* выявленных ранее (см. параграф 6.2) закономерностей возникновения техногенных происшествий рассмотренным выше принципам системной динамики. Напомним, что некоторые из них указывают на особую роль структуры и обратных связей сложной системы в ее функционировании, а значит — и на их большое влияние на возникновение в ней всевозможных проблем. В частности, это может проявляться, например, в образовании причинных цепей тех предпосылок, которые обусловлены исключительно внутрисистемными факторами, в том числе и показанными на рис. 6.4.

Изложенные соображения свидетельствуют о перспективности выбранного выше основного научного метода для системного исследования происшествий в техносфере путем их модельного представления в виде каких-либо причинно-следственных диаграмм. При этом может быть использован тот положительный опыт изучения рассматриваемых здесь человекомашинных систем, который базируется на соответствующих принципах общей теории систем и системной динамики. Из этих принципов, в частности, следует целенаправленность поведения подобных объектов, проявляющаяся в их стремлении к сохранению неизменности на дискретных интервалах времени, что обусловлено внутренними причинами, включая и приспособительную реакцию к неблагоприятным воздействующим факторам.

В рассматриваемых здесь (опасных) технологических операциях неустойчивость соответствующей человекомашинной системы может интерпретироваться, например, появлением предпосылок к происшествию, вызванных возмущающими факторами, а его возникновение — превышением параметров этих факторов над ее адаптивными возможностями или запаздыванием с реакцией на них. Это означает, что исследование процессов появления и развития подобных случайных событий не может быть одномоментным, а каждая его итерация должна включать упомянутые выше (см. параграф 6.6) три шага: эмпирический системный анализ, проблемно ориентированное описание, теоретический системный анализ. Совокупность только что указанных этапов с их элементами и взаимосвязями будет представлять собой структуру системного исследования происшествий на ОПО, которая наглядно представлена на рис. 9.1 соответствующей диаграммой.

Первым крупным этапом данной структуры служит эмпирический системный анализ, направленный на выявление проблемных ситуа-

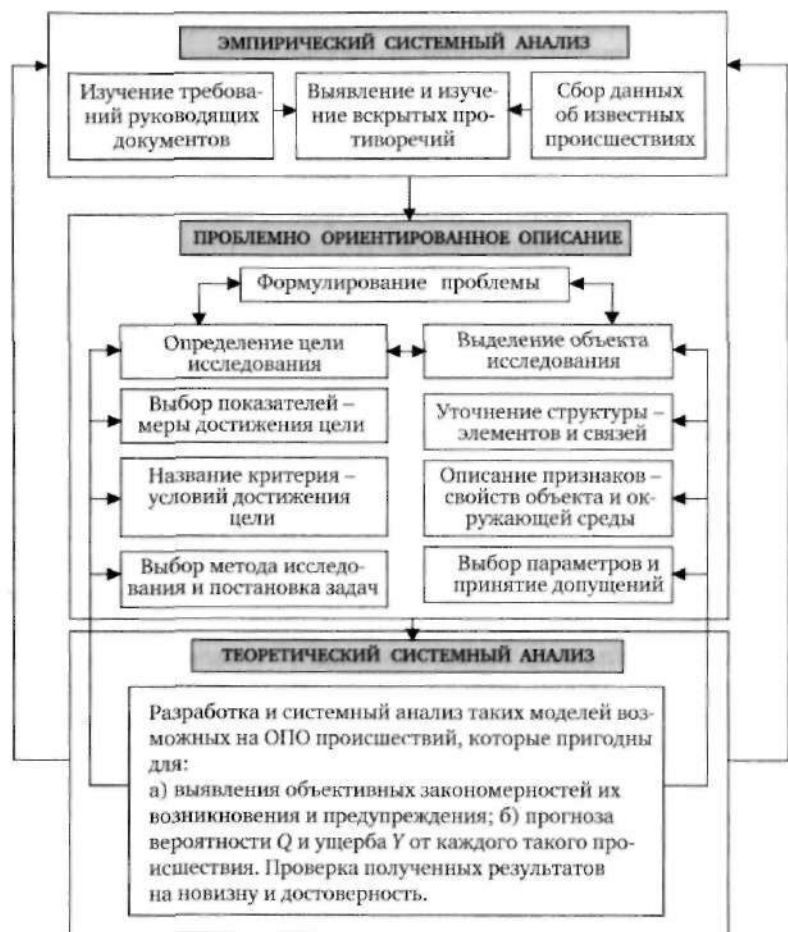


Рис. 9.1. Структура системного исследования происшествий на ОПО

ций с обеспечением безопасности на конкретном ОПО. Данный анализ основывается на изучении соответствующих требований, с одной стороны, и на сборе статистических данных по имевшим место происшествиям — с другой. Сопоставление этих сведений позволяет выявлять как различные несоответствия между желаемым и действительным состоянием конкретных опасных процессов, так и состав причастных к этому факторов — тех свойств человекомашинной системы, которые наиболее часто фигурируют в анализируемых данных.

В процессе осуществления рассматриваемого этапа широко используются различные способы сбора и преобразования имеющихся эмпирических данных, которые обычно направлены на повышение информативности отражаемых ими признаков или снижение их раз-

мерности. Наиболее предпочтительны в этом отношении такие, уже упомянутые выше методы (см. параграф 2.7), как проверка статистических гипотез и регрессионные алгоритмы, а также кластерный, дискриминантный и факторный анализ.

Важность данного этапа обусловлена его значимостью для последующего системного исследования происшествий: в случае некачественного проведения эмпирического системного анализа возможны так называемые *ошибки третьего рода* — неверные выводы при ошибочных исходных предположениях. И наоборот, качественное проведение сбора и обработки статистических данных обеспечивает адекватность отображения реального положения дел с предупреждением происшествий, что требуется для принятия решения о необходимости дальнейшего исследования с помощью моделирования. Дело в том, что любые эмпирические данные — следствие проявления объективно существующих законов, поэтому тщательное изучение опыта и статистики является исключительно важным и плодотворным.

Вторым этапом рассматриваемой структуры служит уже *проблемно-ориентированное описание* объекта и цели системного исследования конкретных происшествий. Его осуществление позволяет фокусировать внимание лишь на тех функциональных компонентах ОПО, которые должны рассматриваться с целью выявления закономерностей появления и предупреждения аварийности и травматизма, а также оценки их параметров. Этот этап предполагает более четкое формулирование проблемной ситуации, идентификацию связанной с ней системы «человек — машина — среда», уточнение характера ее взаимодействия с внешней средой, определение цели предстоящего моделирования и системного анализа, выбор количественных показателей и критериев оценки приемлемости техногенного риска.

Реализация данного этапа системного исследования включает выполнение следующих основных действий:

а) формулирование проблемной ситуации, т.е. выявление породивших ее факторов, а также организаций или лиц, заинтересованных в их ликвидации;

б) уточнение цели ее предстоящего анализа и синтеза мер по ликвидации — определение необходимых для этого изменений, соответствующих методов, показателей и критериев;

в) выделение объекта (конкретной человекомашинной системы), уточнение структуры, свойств и характера взаимодействия ее элементов, определение игнорируемых и учитываемых факторов, а также тех их параметров, которые наиболее важны для появления и устранения происшествий.

Третий этап системного исследования связан с *теоретическим системным анализом и синтезом* и направлен на уточнение представлений об условиях возникновения и предупреждения тех техногенных

происшествий, которые возможны при функционировании рассматриваемой человекомашиной системы. Основой для выявления этих условий и соответствующих факторов могут служить указанные выше принципы и закономерности поведения сложных систем (см. параграф 4.5), а также результаты, уже полученные на самом первом этапе, т.е. при осуществлении эмпирического системного анализа.

Особое место при проведении теоретического системного анализа происшествий на производстве и транспорте следует уделять *моделированию* процессов их появления и развития. Это обусловлено прежде всего неприемлемостью по этическим и экономическим соображениям экспериментального изучения тех аспектов, которые касаются жизни и здоровья людей, значительного ущерба материальным ценностям и природным ресурсам. В этих условиях только моделирование позволяет пополнить представления о закономерностях возникновения и предупреждения техногенных происшествий, компенсировать дефицит в соответствующих статистических данных и эмпирическом опыте.

Что касается наиболее подходящих для этого моделей, то при их выборе целесообразно руководствоваться выявленными ранее (см. параграф 6.2) закономерностями появления техногенных происшествий. При этом оказывается, что лучше всего моделировать данный случайный процесс в два этапа: а) вначале с помощью графических диаграмм причинно-следственных связей, учитывающих влияние предпосылок типа «отказ техники», «ошибка человека» и «нерасчетное для них внешнее воздействие» на процесс появления конкретного происшествия; б) затем — путем разработки и анализа аналитических или алгоритмических моделей, полученных после дальнейшей формализации подобных «диаграмм влияния». Данное деление обусловлено необходимостью одновременного оперирования большим числом объективно действующих факторов, что непосильно оперативной памяти человека без их предварительной графической фиксации на бумаге или экране компьютера.

Важной задачей теоретического системного анализа является выявление объективных закономерностей возникновения и предупреждения техногенных происшествий, а также априорная оценка соответствующего риска. Подобный прогноз возможен лишь с использованием только что упомянутых графических и математических моделей, которые лучше всего пригодны для количественной оценки вероятности  $Q(t)$  появления конкретных происшествий и среднего ущерба  $Y(t)$  от них людским, материальным и природным ресурсам.

Что касается качества реализации обобщенной процедуры, представленной на рис. 9.1, то оно гарантируется лишь после проверки достоверности результатов, полученных на каждой итерации. Необходимость и особенности такой проверки проиллюстрированы там текстом и линиями со стрелками, указывающими на сведения,

нуждающиеся в дополнительном контроле. При этом также предполагается, что применение предложенной процедуры системного исследования техногенных происшествий должно осуществляться регулярно, с периодическим информированием администрации ОПО о полученных при этом результатах.

## 9.2. Символика и способы задания диаграмм причинно-следственных связей

Как следует из рассуждений предыдущего параграфа, основные требования к моделированию происшествий при функционировании человекомашинных систем заключаются в необходимости учета ряда специфических особенностей. В частности, основные из них состоят в следующем:

- а) оперирование лишь наиболее существенными факторами аварийности и травматизма на производстве и транспорте;
- б) возможность их формализации и количественного измерения;
- в) использование для этого языков и алгоритмов, удобных для семантического представления исследуемых категорий и обработки средствами электронной вычислительной техники.

Наиболее полно удовлетворяют этим требованиям модели, представляющие процесс появления и развития техногенных происшествий в виде **диаграмм причинно-следственных связей**. Под такими диаграммами обычно понимают некоторое формализованное представление моделируемых категорий (свойств, состояний, событий) в виде множества графических символов (узлов, вершин) и отношений (предполагаемых или реальных связей) между ними. Самое широкое распространение ныне получили диаграммы в форме различных *графов* (поточковых либо состояний и переходов), *деревьев* (отказа либо происшествия, событий, свойств, целей) и *сетей* (функциональных схем) детерминистской и стохастической структуры.

Как показывает опыт, основными *достоинствами* перечисленных диаграмм являются: высокая информативность представления и описания исследуемых категорий, хорошая наглядность и декомпозированность, доступность и однозначность понимания пользователями, удобство интерпретации и обработки на средствах вычислительной техники, возможность автоматизации системного анализа этих моделей и системного синтеза мероприятий по совершенствованию их оригиналов. Эти диаграммы позволяют также описывать и оценивать предикаты первого и второго порядков, являющиеся соответственно свойствами и отношениями между ними, а также строить на их основе знаковые модели, пригодные для количественного анализа современными математическими и машинными методами.


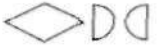







Строка	Символ	Название	Назначение в модели
1		Состояние Событие Свойство	Обозначение существенных элементов объекта (процесса)
2		Исходное или конечное событие	Элементы, не подлежащие дальнейшему анализу
3		Знак «ИЛИ»	Выход — при наличии любого из входных условий
4		Знак «И»	Выход — при появлении одновременно всех входов
5		Стохастический вход и выход	Начало соблюдения условия — с вероятностями $P_1, P_2, P_3$
6		Стохастический узел-разветвление	Начальное и конечное условия — с вероятностями $P_1, P_2, P_3$
7		Отношение	Эпизодическое или логическое влияние
8		Связь Влияние	Постоянное одностороннее или двустороннее действие
9		Маркер (фишка) узла сети Петри	Состояние моделируемого процесса или объекта

Рис. 9.2. Символика диаграмм причинно-следственных связей

Из определения диаграммы причинно-следственных связей следует, что компонентами их структуры служат узлы (вершины) и связи (отношения) между ними. В качестве узлов подразумеваются простейшие переменные или константы — события, состояния, свойства а связей — активности и работы. Перечисленные компоненты графически представляются в виде геометрических фигур, приведенных на рис. 9.2 совместно с их основными характеристиками.

При этом, если совокупности узлов диаграммы как-то влияют друг на друга, то это влияние изображают соответствующими линиями — ветвями, а когда ее узлы задают ветви определенное направление, то эту ветвь называют дугой. Если же существует возможность кругового перемещения по дугам, соединяющим два и более узлов, то данная совокупность дуг и узлов образует так называемые циклы (петли). Последние могут характеризоваться порядком  $n$ , определяемым числом не связанных между собой петель первого порядка. В свою очередь, петля первого порядка не должна содержать в себе других петель, что обеспечивает достижимость любых ее узлов.

Каждый узел диаграммы характеризуется множеством значений, принимаемых соответствующей переменной, а его дуга или ребро — условными распределениями вероятностей их появления. В вырожденных случаях такого распределения узел может представлять константу, принимающую маргинальное (граничное) значение переменной, т.е. наряду с условными распределениями переменных допускается использование и их отдельных значений.

Одним из важнейших достоинств диаграмм причинно-следственных связей, как отмечалось выше, является сравнительная легкость их последующей формализации. Это означает, что на основе моделей типа «граф», «сеть» или «дерево» могут быть получены эквивалентные им математические соотношения, пригодные для соответствующего качественного и количественного анализа, включая оптимизацию. Однако для перехода от графических моделей к математическим нужно использовать дополнительную символику.

Вот почему переменные и константы, представленные узлами конкретной диаграммы, в последующем будут также обозначаться соответствующими символами, которые объединяются в следующие подмножества (самое последнее из них может исключаться из этого набора, если в качестве переменных параметров используются только случайные величины):

$U = \{1, 2, 3, \dots, j, \dots, u\}$  — множество узлов или вершин диаграммы;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_u\}$  — множество соответствующих им переменных;

$\Omega = \{\Omega_j\}$ , где  $\Omega_j = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots\}$  — множество переменных диаграммы и область значений, принимаемых каждой конкретной ( $j$ -й) переменной;

$f_j \in F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$  — множество плотностей вероятности распределения числовой стохастической переменной  $j$ ;

$\pi_j \in \Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$  — функция принадлежности лингвистической переменной.

Для обозначения отношений между вершинами причинно-следственной диаграммы также используются массивы соответствующих символов. Эти массивы могут быть представлены, например, следующим образом:

$D = D_{ij} = \{d_{12}, d_{23}, d_{31}, \dots\}$  — множество дуг (ребер), соединяющих узлы  $i$  и  $j$  диаграммы;

$A = \{A_j\}$  — совокупность векторов входящих дуг в узел  $j$  (входят в него из предшествующих вершин-узлов);

$B = \{B_j\}$  — совокупность векторов исходящих дуг из узла  $j$  (выходят из узла  $j$ , связывая его с последующими вершинами);

$P = P_{ij}$  — матрица мер возможности или вероятности реализации переходов от узла  $i$  к узлу  $j$ ;



$T = T_{ij}$  — матрица изменений величины ресурса (затрат средств или времени) при переходе от узла  $i$  в узлы  $j$ .

Введенные выше обозначения элементов диаграммы влияния позволяют формализовать и однозначно интерпретировать любой моделируемый процесс или предмет. Так, например, перечисленные выше характеристики ее узлов (вершин) могут быть выражены следующим кортежем:  $\langle U, V, \Omega, F, \Pi \rangle$ , а заданные этой же диаграммой отношения или связи между ними —  $\langle D, A, B, P, T \rangle$ . В свою очередь, математическое представление всей диаграммы в общем случае может быть выражено следующей *металингвистической формулой*:

$$\langle \text{Диаграмма влияния} \rangle := \langle |U \wedge V \wedge \Omega \wedge F \wedge \Pi| \wedge |D \wedge A \wedge B \wedge P \wedge T| \rangle. \quad (9.1)$$

Конкретное применение только что рассмотренных графических и математических символов при моделировании процесса возникновения и развития техногенных происшествий будет проиллюстрировано в следующих трех главах настоящей книги. Однако для лучшего восприятия соответствующего материала вначале ознакомимся с основными типами применяемых в них диаграмм причинно-следственных связей.

### 9.3. Классификация и краткая характеристика основных типов диаграмм влияния

Пожалуй, самым известным типом рассматриваемых здесь диаграмм является граф, использование которого в исследовательских целях было продемонстрировано Л. Эйлером еще в 1736 г. — при решении так называемой задачи о кенигсбергских мостах. Под графом же обычно подразумевают множество вершин и тех упорядоченных или неупорядоченных их пар, которые используются для визуального представления моделируемого процесса. При этом считается, что упорядоченные пары вершин соединяются дугами (ребрами), а неупорядоченные пары вершин — неориентированными ветвями. Упорядоченность означает изменчивость моделируемых характеристик в зависимости от последовательности попарного рассмотрения вершин. Математическое выражение моделируемого графом процесса имеет вид следующего кортежа:  $\langle U, V, D, P \rangle$ .

При моделировании техногенных происшествий ниже будут использоваться только ориентированные графы, содержащие конкретный набор важных состояний рассматриваемой человекомашиной системы и возможные направления их смены. Графически состояния исследуемого процесса представляются прямоугольниками, окружностями или другими промаркированными геометрическими фигурами, а переходы между ними — линиями со стрелками на одном конце, т.е. примерно так, как это показано на рис. 9.3.

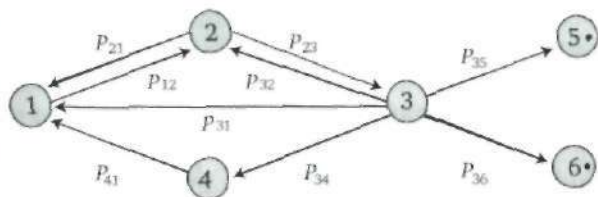


Рис. 9.3. Граф состояний и переходов

Изображенный на данном рисунке граф состояний и переходов интерпретирует процесс возникновения происшествий при функционировании человекомашиной системы, а его структура включает шесть состояний и девять переходов  $D_{ij}$  с соответствующими вероятностями  $P_{ij}$ . Среди состояний имеются следующие: безопасное, опасное, предаварийное, поставарийное и два «поглощающих» состояния, соответствующих смертельному несчастному случаю (5) и катастрофе (6). Эти помеченные точками состояния графа не имеют исходящих дуг и поэтому способны приостанавливать моделируемый процесс.

Таким образом, показанный на рис. 9.3 процесс может быть зарегистрирован как имеющий следующие значения введенных ранее параметров:

$$U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\},$$

$$V = \{\text{вышеприведенные наименования состояний}\},$$

$$D = \{1-2, 2-1, 2-3, 3-2, 3-1, 3-4, 3-5, 3-6, 4-1\},$$

$$P = \{P_{12}, P_{21}, P_{23}, P_{32}, P_{31}, P_{34}, P_{35}, P_{36}, P_{41}\}.$$

Другим способом задания параметров исследуемых здесь опасных процессов может служить использование различных таблиц, матриц и функций. Порядок представления, преобразования, анализа и синтеза графов с помощью матриц истинности, смежности, инцидентий и соответствующих им передаточных или производящих функций подробно описан в соответствующей литературе, например в работах [16, 17]. Почти все эти способы формализации и моделирования процесса появления техногенных происшествий иллюстрируются ниже на конкретных примерах.

Однако в современных исследованиях происшествий более широкое распространение получили диаграммы причинно-следственных связей, имеющие ветвящуюся структуру и называемые «деревом». Впервые возможность использования подобных моделей для нужд оценки надежности и безопасности эксплуатации американских ракетных систем «Минитмен» была продемонстрирована Х. Уотсоном в 1961 г. В настоящее время чаще всего используются два типа этих диаграмм — «дерево происшествия» и «дерево событий», каждый из которых представляет собой разветвленный, конечный и связный граф, не имеющий петель или циклов.

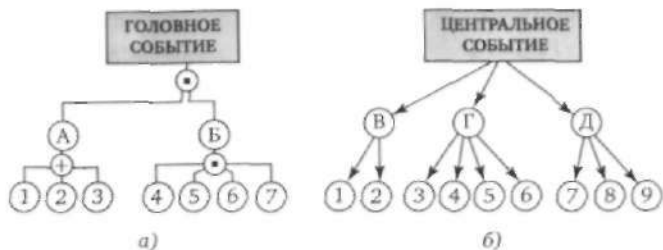


Рис. 9.4. Диаграммы причинно-следственных связей типа «дерево»:  
 а — дерево происшествия; б — дерево событий

Последние два свойства означают, что каждая пара вершин диаграммы типа «дерево» должна быть связанной (соединенной) ребром или дугой, однако все их соединения не должны образовывать такие последовательности-маршруты, вершины которых одновременно являлись бы началом одних и концом других подобных ветвей. Кратко охарактеризуем самые отличительные признаки каждой подобной диаграммы влияния с помощью рис. 9.4.

Модель типа «дерево происшествия» (см. рис. 9.4, а) обычно включает одно (головное) событие, соединенное с помощью логических условий двух типов с теми промежуточными и исходными предпосылками, возникновение части из которых может привести к появлению конкретного техногенного происшествия. Головное событие подобного «дерева» как раз и представляет собой заранее оговоренную аварию, несчастный случай или катастрофу, а его «ветви» — наборы соответствующих предпосылок, образующие причинные цепи конкретного происшествия. «Листьями» же этой модели служат исходные события, означающие такие ошибки, отказы и неблагоприятные внешние воздействия, детализация которых нецелесообразна, так как могут быть получены сведения о вероятности их возникновения.

Процесс появления конкретного происшествия будет интерпретироваться данной моделью как прохождение некоторого сигнала от каких-либо исходных событий-предпосылок, инициирующих причинную цепь (служащих его истоками), к головному событию, являющемуся как бы стоком этой модели. В качестве промежуточных состояний данного дерева рассматриваются предпосылки верхнего и последующих уровней, а узлов-регуляторов потока (см. рис. 9.2) — логические условия сложения (ИЛИ) и перемножения (И), используемые в булевой алгебре.

Подобно дереву происшествия, дерево *событий* — его исходных (см. рис. 9.4, б) имеет одно (центральное) событие и несколько исходящих из него дуг или ребер, направленных в противоположную от него сторону. В качестве центрального события ниже всегда будет рассма-

триваться конкретное техногенное происшествие, а последовательности других событий-исходов — сценарии причинения ущерба различным объектам. Учитываемые этой моделью сценарии будут отличаться условиями нежелательного высвобождения, распространения, трансформации и разрушительного воздействия на оказавшиеся вблизи объекты тех потоков энергии и вредного вещества, которые образовались в момент возникновения данного происшествия.

В отличие от дерева происшествия дерево событий не имеет логических узлов И, ИЛИ. В сущности, оно представляет собой вероятностный граф, построенный так, что сумма безусловных вероятностей всех разветвлений одного уровня должна составлять единицу. Иначе говоря, все такие исходы образуют полную группу несовместных событий.

Как следует из рис. 9.4, при моделировании процесса появления и развития техногенного происшествия с помощью диаграмм типа «дерево» используется приведенная выше (см. рис. 9.2) символика, т.е. учитываемые события изображаются прямоугольниками или окружностями с надписями или цифровыми кодами, а логические узлы — малыми кругами со знаками «+» (для логического условия ИЛИ) и «\*» (для условия И).

Математический же эквивалент подобного «дерева» имеет вид кортежа  $\langle U, V, W, D, A, B, P \rangle$ , удобного для представления условий возникновения конкретного происшествия в виде выражения алгебры событий. Например, для показанной на рис. 9.4, а модели оно имеет вид

$$\langle \text{Головное событие} \rangle = (A \wedge B) = (1 \vee 2 \vee 3) \wedge (4 \wedge 5 \wedge 6 \wedge 7). \quad (9.2)$$

Особенности использования подобных (структурных) формул при прогнозировании меры возможности конкретных аварий, катастроф и несчастных случаев с людьми будут изложены в следующих двух главах — на конкретных примерах, с использованием точных и приближенных оценок данного параметра техногенного риска.

В последнее время при моделировании сложных систем начали применяться диаграммы, называемые сетями или функциональными схемами, которые напоминают графы, однако узлы и дуги сети уже учитывают дополнительную информацию. При этом наиболее пригодными для системного исследования условий возникновения и предупреждения техногенных происшествий считаются сети стохастической структуры типа *сетей Петри* и GERT<sup>1</sup>. Учитывая дефицит отечественных публикаций и перспективность исследования техногенных

<sup>1</sup> В отличие от более известных сетей PERT (*Program Evaluation and Research Technique* — методика сетевого планирования и управления), более совершенные сети GERT (*Graphic Evaluation and Review Technique*) пока что не нашли должного применения в нашей стране.

происшествий с помощью этих диаграмм, остановимся на них подробнее.

Начнем с констатации их основных достоинств, к которым обычно относят:

а) возможность объединения логических и графических способов представления исследуемых событий;

б) учет стохастичности информации, выраженной узлами и дугами;

в) доступность для моделирования параллельно протекающих, циклических и многократно наблюдаемых процессов;

г) наибольшие (по сравнению с другими типами диаграмм) возможности — в смысле строгости, компактности и простоты корректировки моделируемых событий и явлений.

Отличительной же особенностью функциональных схем или сетей типа Петри [38] и GERT [51] служит не детерминистская (как PERT), а так называемая стохастическая структура. Это означает, что для завершения моделируемого ими процесса или появления промежуточного события, интересующего исследователя, необходимо реализовать не все входящие дуги, а только ту их совокупность, которая необходима и минимально достаточна для достижения соответствующего узла. В тех случаях, когда требуемое для этого время или иной ресурс является переменной величиной, реализация конкретных дуг сети сопровождается выбором ее значения в соответствии с заданным вероятностным или возможностным распределением.

Кроме того, в общем случае обе этих сети имеют четыре типа символов, называемых источником, стоком, меткой или планкой и статистикой. Как и в других диаграммах причинно-следственных связей, узлы изображаются окружностью, планкой (вертикальной жирной чертой) или иными фигурами, иногда помеченными какими-либо маркерами, а дуги — линиями со стрелками, исходящими из узлов или входящими в них.

Заметим также, что в отличие от графов и деревьев узлы сети Петри могут характеризоваться еще и раскраской, а сети GERT — числом степеней свободы. Раскраска, т.е. использование разноцветных маркеров, позволяет учесть разнородность состояний или потоков информации, моделируемых сетями Петри, а введение степеней свободы — количество тех условий, которые необходимы для реализации конкретного узла сети GERT, предшествуя его появлению, и которые в последующем иногда будут называться предцессорами. В целом же эти и другие дополнительные возможности стохастических функциональных сетей позволяют не только увеличить множество учитываемых признаков исследуемого объекта или процесса, но и упростить структуру их моделей.

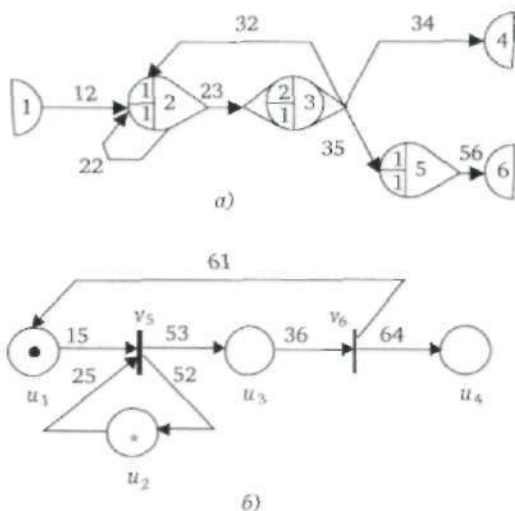


Рис. 9.5. Диаграммы причинно-следственных связей типа «сеть стохастической структуры»:

а — сеть GERT; б — сеть Петри

Проиллюстрируем содержание приведенных выше понятий с помощью представленных на рис. 9.5 двух простейших диаграмм рассматриваемого здесь типа: сеть GERT и сеть Петри. Каждая из них содержит одинаковое число узлов и связей между ними — 6 и 7 соответственно. Да и интерпретируют эти сети фактически однотипный процесс в сложных технических системах, содержание которого будет раскрыто частично после пояснения предназначения всех элементов этих двух моделей, а окончательно — непосредственно перед количественным анализом одной из них.

Начнем с рассмотрения узлов  $U$  и дуг  $D_{ij}$  сети GERT (рис. 9.5, а). Ее узел 1 служит истоком (не имеет входных дуг), а узлы 2 и 5 являются стохастическими по выходу. Последние имеют соответственно 2 и 1 инцидентные по входу предшествующие связи со степенями свободы, равными единице для начальной (цифры 1 в левом верхнем секторе этих узлов) и последующих реализаций моделируемого процесса (такие же цифры в соответствующих нижних секторах). Узлы 4 и 6 служат в рассматриваемой сети стохастической структуры одновременно и стоками (у них нет выходных дуг), и статистиками.

А вот узел 3 является стохастическим узлом-разветвлением (см. рис. 9.2), он имеет две степени свободы в первой реализации и одну — в последующих. Данная сеть содержит в себе также два цикла: соб-

ственный<sup>1</sup> в узле 2 и цикл, образуемый дугами  $d_{23}$ ,  $d_{32}$  и узлами 2 и 3. Последний цикл, как и предыдущий, является циклом первого порядка, так как не включает в себя никаких других циклов, т.е. они не связаны между собой непосредственно.

Поясним, что некоторые узлы сети GERT могут иметь число степеней свободы, превышающее количество своих входящих дуг. В данном случае к ним относится узел 3, который хотя и обладает одной входной дугой  $d_{23}$ , но требует для открытия в первой реализации процесса двух степеней свободы. В подобных ситуациях предполагается многократность выполнения отдельных входных условий: пропуск сигнала такими узлами возможен лишь после многократной (двукратной — для узла 3) реализации части входных дуг.

Что касается сети Петри (рис. 9.5, б), то она включает в себя позиции двух типов: узлы, обозначенные окружностями с символами  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$ , и планки с кодами  $v_5$  и  $v_6$ . Кроме того, там имеются дуги, отличающиеся по отношению к узлам и планкам следующим: а)  $d_{15}$ ,  $d_{25}$  и  $d_{36}$  являются для планок входящими дугами, а  $d_{52}$ ,  $d_{53}$  и  $d_{64}$  — выходящими из них, тогда как дуги  $d_{52}$ ,  $d_{53}$ ,  $d_{61}$  и  $d_{64}$  служат у узлов  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_1$  и  $u_4$  входящими дугами. При этом узлы диаграмм рассматриваемого здесь типа обычно соответствуют *состояниям*, в которых может находиться моделируемый объект, а планки — *событиям*, влекущим их возможные изменения в ходе последующего функционирования объекта.

Кроме того, в рассматриваемой здесь сети также имеются два цикла: 1) состоящий из двух дуг  $d_{52}$  и  $d_{25}$ , объединяющих планку  $v_6$  и узел  $u_2$ ; 2) образуемый позициями  $u_1$ ,  $v_5$ ,  $u_3$ ,  $v_6$  и объединяющими их дугами 15, 53, 36 и 61. Есть здесь и состояния  $u_1$  и  $u_2$ , помеченные разными *фишками* (точкой и звездочкой внутри соответствующих окружностей). Их наличие в каждой из предшествующих планке  $v_5$  позиций указывают на соблюдение тех предусловий, которые необходимы и достаточны для запуска моделируемого процесса, т.е. для начала смены участвующими в нем объектами своих исходных состояний.

По завершении знакомства с сетями GERT и Петри кратко изложим логику возможного протекания заданных ими процессов, начиная с рис. 9.5, а, где вначале должна реализоваться связь  $d_{12}$ , а затем — одна из выходных дуг  $d_{23}$  или  $d_{22}$  узла 2. После двух реализаций связи  $d_{23}$  будет открыт узел 3 и процесс может пойти по одному из трех возможных направлений. Если реализуется условие  $d_{34}$ , то он будет завершен, а если  $d_{35}$ , то его прекращению в отдельных случаях должно предшествовать осуществление воздействия  $d_{56}$ . В случае реализации

<sup>1</sup> Поясним, что в теории графов под этим термином принято понимать цикл единичной длины.

выхода  $d_{32}$  процесс может возобновиться путем осуществления связей  $d_{23}$  и  $d_{22}$ , однако его предыстория уже будет зафиксирована узлами-метками 2 и 3.

Подобная картина будет иметь место и в сети, изображенной на рис. 9.5, б. В данном случае запуск моделируемого процесса будет сопровождаться перемещением фишки-точки из позиции 1 в позиции 5, 3 и 6, тогда как фишка-звездочка, пробежав по петле  $d_{52}—d_{25}$ , вновь окажется в состоянии 2, поскольку лишь такая их диспозиция удовлетворяет соответствующему правилу. Далее моделируемый сетью Петри процесс будет характеризоваться переходом фишки-точки из позиции 6 в одно из состояний 4 или 1.

Естественно, что представленная сетями логика может быть наполнена конкретным физическим содержанием. Например, рис. 9.5, б способен интерпретировать суперЭВМ, функционирующую в режиме одновременной обработки пакета прикладных программ и периодического автотестирования. При этом считается, что позиции этой сети  $u_1, u_3, u_6$  относятся к одной из решаемых задач: она может находиться в очереди, выполняться или ожидать вывода уже полученного результата; состояние  $u_2$  относится к ожиданию соответствующего процессора, а позиции  $u_1, u_4$  — к началу и завершению выполнения им конкретного задания. Естественно, что начальное положение системы «суперЭВМ — пакет заданий» будет отличаться от того, которое она займет после возвращения фишки-точки в позицию  $u_1$ .

Что касается процесса, показанного на рис. 9.5, а, то его предполагаемый физический смысл, а также результаты прогноза вероятности достижения стоков 4, 6 и требуемого для этого времени будут изложены несколько ниже (см. параграф 12.2).

В целом же из приведенных выше иллюстративных примеров ясно, что сети стохастической структуры позволяют моделировать различные сложные процессы и прогнозировать альтернативные исходы. Вероятность их реализации зависит от распределения тех случайных или лингвистических переменных, которые задаются узлами или ветвями каждой такой сети. Помимо вероятностных параметров, рассматриваемые модели используют практически весь набор данных, предусмотренных для семантического и семиотического моделирования с помощью диаграмм влияния.

Отдельные приложения и области наиболее предпочтительного использования соответствующих моделей и методов исследования различных техногенных происшествий будут подробно раскрыты на конкретных примерах. Важное место при этом займет автоматизированный прогноз надежности и риска с помощью общего логико-вероятностного метода.



## 9.4. Автоматизированное прогнозирование параметров риска с помощью схем функциональной целостности

Общий логико-вероятностный метод является дальнейшим развитием традиционных теоретико-вероятностных методов исследования сложных систем и одновременно служит теоретической основой технологии их автоматизированного структурно-логического моделирования (АСЛМ) [7]. В отличие от ранее применяемых, данный метод использует универсальное графическое средство представления свойств подобных объектов — схемы функциональной целостности (СФЦ). При этом базирующаяся на них компьютерная технология позволяет облегчить их ввод в соответствующий программный комплекс и автоматизировать как построение эквивалентной СФЦ математической модели, так и расчет показателей безопасности, живучести и надежности функционирования исследуемых здесь сложных систем.

В методологическом плане технология АСЛМ аналогична применяемым в зарубежных программных комплексах типа Risk Spectrum или Relex, однако в ней используется три типа логических операций: И (конъюнкция), ИЛИ (дизъюнкция) и НЕ (отрицание). Применение такого (функционально полного) их блока обеспечило возможность оперирования не только монотонными моделями устойчивого функционирования систем, но также принципиально новым классом немонотонных моделей их надежности, безопасности и живучести. При этом *немонотонными* считаются системы, которые способны изменять выходные параметры в направлении, противоположном варьированию входных.

Как и другие методы системного анализа сложных объектов, практическое использование рассматриваемого здесь подхода и основанной на нем технологии в интересах прогнозирования параметров надежности, безопасности и живучести обычно включает четыре основных крупных *этапа*, которые выполняются в следующей последовательности.

1. Формализованная постановка решаемой задачи, или первичное структурно-логическое моделирование, предполагающее разработку и ввод в программный комплекс «АРБИТР» [11] не только структурной модели исследуемой системы в форме СФЦ, но также одного или нескольких логических критериев функционирования, определяющих условия реализации ею какой-либо заранее заданной задачи с определенным уровнем эффективности.

2. Построение логической модели устойчивого функционирования системы в форме минимальной дизъюнктивной нормальной булевой функции состояния всех ее элементов, однозначно определяемой СФЦ

и упомянутым выше критерием. Данный этап осуществляется автоматически как для монотонных, так и для немонотонных логических функций; причем вторые могут представлять различные неприводимые комбинации первых.

3. Построение расчетного вероятностного многочлена, также выполняемое автоматически, с получением расчетного многочлена вероятностной функции при допущениях о независимости в совокупности вероятностных параметров элементов исследуемой системы, несмотря на наличие в ней зависимых событий, выделяемых и представляемых с помощью аналитического аппарата так называемых групп несовместных событий [7].

4. Вычисление вероятностных показателей исследуемых функциональных свойств системы, реализуемое автоматически и с целью априорной оценки выбранных ранее единичных количественных показателей надежности, безопасности и живучести, в том числе и после внедрения мероприятий, предлагаемых для улучшения их значений.

Сервисные средства программного комплекса с технологией АСЛМ полностью обеспечивают первый этап приведенной выше процедуры, что достигается диалоговой поддержкой ввода не только самой СФЦ и всех параметров диаграммы этого типа, но также режимов и критериев автоматизированного моделирования и расчета требуемых системных характеристик моделируемой системы. Все остальные этапы, включая построение математических моделей большой размерности и выполнение довольно сложных и трудоемких расчетов, осуществляются автоматически.

Процедура применения СФЦ подобна известным методикам построения и анализа рассмотренных ранее диаграмм влияния (графов, деревьев, сетей). Однако ей присущ ряд особенностей, которые следует учитывать при построении данных смысловых моделей и их преобразовании в знаковые (математические). Основные из них заключаются в следующем.

1. Помимо известной по табл. 9.2 символики СФЦ оперируют также графическими фигурами, сведения о которых приведены на рис. 9.6.

2. Построение СФЦ начинается с выявления тех элементов ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) случайных бинарных («да», «нет») событий  $x_i$  и логических условий  $\bar{y} = (y_i, \bar{y}_i)$  их реализации или нереализации, которые считаются существенными для моделируемого процесса. Пример подобного (логически-событийного) подхода к формализованному представлению всех существенных факторов-предпосылок, необходимых и достаточных для реализации/нереализации конкретного свойства или результата отдельным элементом-узлом  $i$ , изображен на рис. 9.7 в виде фрагмента СФЦ и соответствующих ему базовых логических уравнений для прямого и инверсного выходов. Поясним, что имеющиеся там

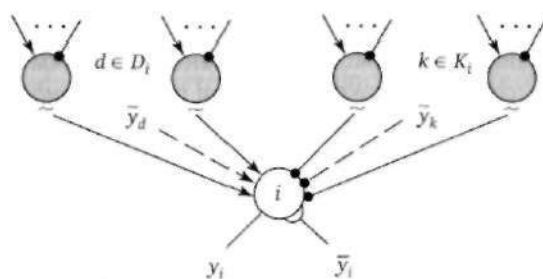
$\textcircled{i} \quad x_i, p_i$	Функциональная вершина. Представляет событие $x_i$ , сопоставленное элементу $i$ системы и происходящее с вероятностью $p_i$
$j \textcircled{\circ}$	Фиктивная вершина — не представляющая элемент и используемая для представления логических условий функционирования системы
$\longrightarrow$	Дизъюнктивная входящая дуга, применяемая для представления логической операции ИЛИ
$\longrightarrow \bullet$	Конъюнктивная входящая дуга, применяемая для представления логической операции И
	Прямая и инверсная исходящие дуги из вершины $i$ , представляющие соответственно условие реализации $y_i$ и условие нереализации $\bar{y}_i$ конкретного требования функции элементом моделируемой системы

Рис. 9.6. Графические и математические символы аппарата СФЦ

символы «&» означают конъюнкцию, т.е. используются наряду со следующим обозначением аналогичного логического оператора: « $\wedge$ ».

Поясним, что приведенные на рис. 9.7 уравнения для  $y_i$  определяют логические условия реализации соответствующей выходной функции, а для  $\bar{y}_i$  — ее нереализации.

3. Подобным образом (с помощью функциональных вершин  $i$ , дизъюнктивных и конъюнктивных дуг, переменных  $x_i$  и вероятностей  $p_i$ ) затем представляются остальные элементы исследуемой системы, а последующее объединение полученных при этом фрагментов СФЦ позволяет логически строго и точно формализовать ее поведение в целом.



$$y_i = x_i (\bigvee_{d \in D_i} \bar{y}_d) \cdot (\bigwedge_{k \in K_i} \bar{y}_k), i \text{ — функциональная вершина}$$

$$y_i = (\bigvee_{d \in D_i} \bar{y}_d) \cdot (\bigwedge_{k \in K_i} \bar{y}_k), i \text{ — фиктивная вершина}$$

$$\bar{y}_i = x_i (\bigvee_{d \in D_i} \bar{y}_d) \cdot (\bigwedge_{k \in K_i} \bar{y}_k), i \text{ — функциональная вершина}$$

$$\bar{y}_i = (\bigvee_{d \in D_i} \bar{y}_d) \cdot (\bigwedge_{k \in K_i} \bar{y}_k), i \text{ — фиктивная вершина}$$

Рис. 9.7. Обобщенный фрагмент СФЦ и базовые логические уравнения

4. Применение при этом для всех функциональных и фиктивных вершин дизъюнктивных  $\tilde{y}_d = (y_d, \bar{y}_d)$  и конъюнктивных  $\tilde{y}_k = (y_k, \bar{y}_k)$  входящих дуг позволяет представлять логические условия реализации ими прямой выходной функции, а двух видов исходящих дуг — монотонные и немонотонные логические условия реализации (прямой выход  $y_i$ ) и нереализации (инверсный выход  $\bar{y}_i$ ) соответствующих выходных функций как отдельными элементами, так и исследуемым объектом в целом.

5. В последующем (после ввода в программный комплекс) все эти логические переменные и вероятностные характеристики используются при автоматическом построении логических и вероятностных математических моделей исследуемой системы, необходимых для проведения их количественного анализа с целью прогнозирования ее искомых характеристик.

Для демонстрации возможности прогнозирования параметров надежности, безопасности и живучести рассмотренным выше (четырёхэтапным) способом проиллюстрируем, как это делается на примере простейшей двухэлементной дублированной системы, функциональная схема (блок-схема) работоспособности которой приведена на рис. 9.8.

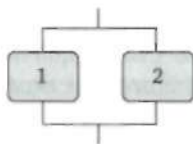


Рис. 9.8. Функциональная схема работоспособности системы

1. Прогнозирование показателей надежности (безотказности) системы. При построении соответствующей СФЦ (рис. 9.9) использован событийно-логический подход к анализу приведенной выше функциональной схемы и введены два случайных события  $x_1$  и  $x_2$ , соответствующие безотказному срабатыванию элементов, представленных двумя функциональными вершинами с номерами 1 и 2 соответственно. При этом параметры надежности (безотказности, готовности) этих элементов составляют  $p_1 = 0,85$  и  $p_2 = 0,95$ .

Показанная СФЦ является ориентированным графом, а имеющиеся в нем исходящие дуги  $y_1, y_2$  из функциональных вершин 1 и 2 представляют логические условия реализации каждым элементом своих функций. Эти же ребра графа одновременно служат дизъюнктивными (операция ИЛИ) входящими дугами фиктивной вершины 6, которая выражает условие  $y_6 = y_1 \vee y_2$ , являющееся логическим критерием  $Y_n = y_6$  надежности (безотказности, готовности) рассматриваемой системы в целом.

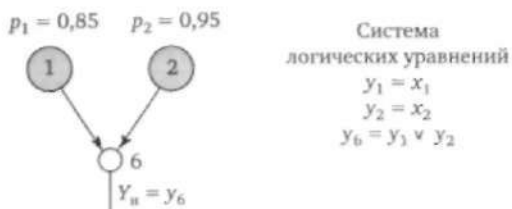


Рис. 9.9. Схема функциональной целостности для надежности системы

В правой части рис. 9.9 приведены логические выражения для реализации выходов всех его трех вершин, которые составлены на основе базовых логических соотношений, приведенных на рис. 9.7. Эта система уравнений является точным аналитическим (логическим) аналогом разработанной СФЦ надежности системы. В программном комплексе АСЛИМ такие системы формируются автоматически и используются для проведения требуемых вычислений.

Затем (на втором этапе) на основе разработанной СФЦ и заданного логического критерия программный комплекс автоматически решает соответствующую систему логических уравнений и определяет логическую функцию надежности. Так, для рис. 9.9 она имеет вид

$$Y_1 = y_1 \vee y_2 = x_1 \vee x_2. \quad (9.3)$$

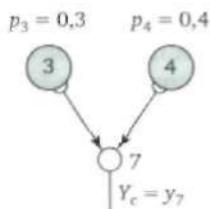
Далее, на третьем этапе этот же комплекс автоматически преобразует полученную логическую функцию в «правильный» (точный) многочлен расчетной вероятностной функции. При предположении о независимости событий  $x_1$  и  $x_2$  она выражается уравнением

$$P_1 = p_1 + q_1 p_2, \quad (9.4)$$

где  $q_1 = 1 - p_1$  — величина, дополняющая вероятность надежного срабатывания первого элемента этой системы до единицы.

На завершающем (четвертом) этапе программный комплекс выполняет (используя только что приведенный многочлен вероятностной функции) точный расчет искомой вероятностной характеристики системы. При этом (в нашем случае) оказывается, что вероятность ее безотказной работы  $P_n = 0,85 + 0,15 \cdot 0,95 = 0,9925$ .

II. Прогнозирование показателей защищенности системы. Как и ранее (см. параграф 3.1), под защищенностью (структурной стойкостью или условной живучестью) подразумевается способность системы сохранять работоспособность после воздействия опасных факторов, возникающих при взрыве, пожаре или в иных нестандартных ситуациях, чреватых повреждением ее элементов. При этом условность живучести определяется достоверностью возникновения поражающих факторов, тогда как надежность элементов считается абсолютной.



Система  
логических уравнений

$$\bar{y}_3 = \bar{x}_3$$

$$\bar{y}_4 = \bar{x}_4$$

$$y_7 = \bar{y}_3 \vee \bar{y}_4$$

Рис. 9.10. Схема функциональной целостности для защищенности системы

На первом этапе построения СФЦ для защищенности исследуемой здесь (см. рис. 9.8) системы будут использованы два новых случайных события  $x_3$  и  $x_4$ , означающие независимое поражение ее элементов 1 и 2 достоверно возникшим поражающим фактором. В СФЦ защищенности, показанной на рис. 9.10, эти случайные события представлены функциональными вершинами 3 и 4. При этом поражение данных элементов достоверно возникшим поражающим фактором происходит с вероятностями  $p_3 = 0,3$  и  $p_4 = 0,4$  соответственно.

Условиями непоражения (сохранения работоспособности благодаря резистентности или стойкости) элементов 1 и 2 в данном случае будут уже инверсные исходящие дуги  $\bar{y}_3$ ,  $\bar{y}_4$  из показанных выше вершин 3 и 4. Условие  $y_7 = \bar{y}_3 \vee \bar{y}_4$  соответствует также и исходящей дуге из имеющейся там фиктивной вершины 7 и является логическим критерием  $Y_c = y_7$  защищенности исследуемой здесь системы в целом.

Результаты всех остальных этапов автоматического построения — вначале логической и вероятностной математических моделей, а затем формул для расчета защищенности (стойкости или условной живучести) данной системы по отношению к достоверно возникшим опасным фактором — принимают вид следующих логических и алгебраических уравнений:

а) логическая функция защищенности данной элементарной системы:

$$Y_c = y_7 = \bar{y}_3 \vee \bar{y}_4 = \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4; \quad (9.5)$$

б) многочлен расчетной вероятностной функции защищенности исследуемой здесь системы:

$$P_c = q_3 + p_3 q_4, \quad (9.6)$$

где  $q_3 = 1 - p_3$ ,  $q_4 = 1 - p_4$  — параметры стойкости всех ее элементов;

в) вероятность защищенности (вероятность непоражения данной системы) оказалась равной  $P_c = 0,89$ .

III. Прогнозирование безопасности (как дополнения интегрального показателя техногенного риска) осуществим с использованием

показанной на рис. 9.9 модели надежности, которую дополним тремя фиктивными вершинами, присвоив им цифровые коды 100, 70 и 30. Предположим также, что соответствующие им комбинации  $Y_{0j}$  отказов элементов моделируемой системы приводят к возникновению техногенных происшествий с конкретными разрушительными последствиями  $Y_j = F_j$ , оцениваемыми в условных единицах измерения ущерба:

$$\begin{aligned} Y_{01} = y_{100} &= \bar{y}_6 \cdot \bar{y}_7, F_1 = 100 \text{ у.е.}; \\ Y_{02} = y_{70} &= \bar{y}_6 \cdot y_7, F_2 = 70 \text{ у.е.}; \\ Y_{03} = y_{30} &= y_6 \cdot \bar{y}_7, F_3 = 30 \text{ у.е.} \end{aligned} \quad (9.7)$$

СФЦ для оценки безопасности функционирования рассматриваемой здесь системы, полученная подобным способом, изображена на рис. 9.11.

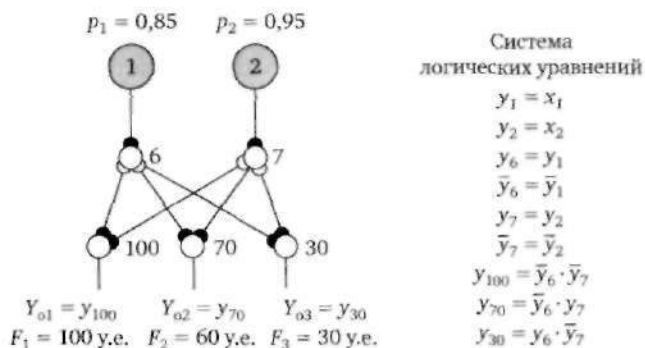


Рис. 9.11. Схема функциональной целостности для безопасности системы

Приведенные входящие дуги узлов 100, 70 и 30, одновременно являющихся исходящими дугами из вершин 6 и 7, указывают логические условия возникновения различных исходов происшествия, тогда как исходящие дуги этих же узлов данной модели задают уже логические критерии всех этих нежелательных событий, характеризующихся различными последствиями для системы и имеющих вид математических зависимостей (9.7).

Автоматизированный расчет каждого параметра интегрального показателя техногенного риска  $M_i(Y) = R(F_j)$  с помощью технологии АСЛМ показал, что

$$\begin{aligned} R(F_1) &= p(Y_{01}) = p(\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) = q_1 q_2 = 0,15 \cdot 0,05 = 0,0075; \\ R(F_2) &= p(Y_{02}) = p(\bar{x}_1 \cdot x_2) = q_1 p_2 = 0,15 \cdot 0,95 = 0,1425; \\ R(F_3) &= p(Y_{03}) = p(x_1 \cdot \bar{x}_2) = p_1 q_2 = 0,85 \cdot 0,05 = 0,0425. \end{aligned} \quad (9.8)$$

Следует отметить, что СФЦ, примененная выше для прогнозирования уровня безопасности функционирования выбранной для примера системы по интегральному показателю техногенного риска, а также логические и вероятностные модели для происшествий с ущербом в 70 и 30 у.е. являются немонотонными, несмотря на то что исходная модель надежности была и остается монотонной по определению.

IV. В завершение рассмотрим прогнозирование показателей (полной, безусловной) живучести, под которой подразумевается способность системы сохранять (хотя бы частично) работоспособность при случайных поражениях ее элементов вследствие возникновения опасных факторов взрывов, пожаров и т.п. При этом надежность элементов, как и прежде, считается абсолютной, а для учета случайности поражающего фактора в разрабатываемую СФЦ вводится соответствующее событие  $x_5$ , появление которого эквивалентно воздействию и возможному поражению элементов 1 и (или) 2 системы, а непоявление — достоверному сохранению их работоспособности.

Путем дополнения ранее разработанной модели защищенности (см. рис. 9.10) функциональной вершиной 5 (возникновение поражающего фактора) и указанием на соответствующем графе дугой  $y_5$  условий наступления событий  $x_3, x_4$  (поражения элементов 1 и 2), получим СФЦ, пригодную уже для априорной оценки живучести рассматриваемой системы. Данная графическая модель и эквивалентные ей уравнения алгебры логики показаны на рис. 9.12.

Предположим также, что возникновение поражающего фактора происходит с вероятностью  $p_5 = 0,7$ , а вероятности  $p_3 = 0,3, p_4 = 0,4$  являются параметрами уязвимости элементов 1 и 2 системы по отношению к этому фактору. Выход имеющейся в этой СФЦ фиктивной вершины 7 представляет условие  $y_7 = \bar{y}_3 \vee \bar{y}_4$  сохранения работоспособности хотя бы одним из данных элементов, которое как раз и является критерием  $Y_{ж} = y_7$  живучести (уже полной, а не условной — как для защищенности) системы при случайном возникновении и воздействии на нее поражающего фактора.

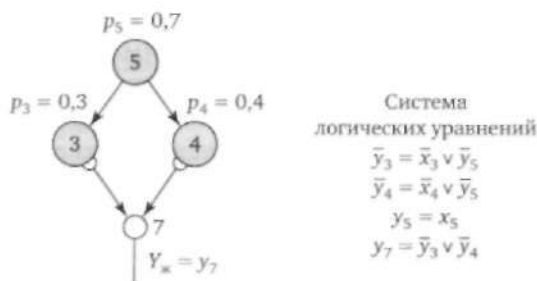


Рис. 9.12. Схема функциональной целостности для живучести системы



Результаты следующих трех этапов моделирования и расчета живучести, автоматически полученные с помощью программного комплекса «АРБИТР», представлены ниже:

а) логическая функция стойкости исследуемой здесь элементарной системы

$$Y_{ж} = y_7 = \bar{y}_3 \vee \bar{y}_4 = \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_3; \quad (9.9)$$

б) расчетный многочлен соответствующей вероятностной функции

$$P_{ж} = q_4 + p_4q_5 + q_3p_4p_5, \quad (9.10)$$

где  $q_3 = 1 - p_3$ ,  $q_4 = 1 - p_4$  — параметры стойкости элементов данной системы;

в) вероятностный показатель живучести ее функционирования  $P_{ж} = 0,916$ .

Следует отметить, что СФЦ для живучести исследуемой двухэлементной системы (см. рис. 9.12) также оказалась немонотонной по построению. Это означает, в частности, что подобная структурная модель живучести не может быть построена с помощью таких диаграмм влияния, как дерево происшествия. Вместе с тем полученные здесь логическая и вероятностная функции живучести еще остаются монотонными в рамках принятых содержательных определений используемых элементарных событий.

Как представляется, рассмотренные выше примеры иллюстрируют конструктивность использования общего логико-вероятностного метода и основанной на нем технологии АСЛМ для моделирования и расчета показателей таких наиболее важных свойств функционирования сложных систем, как надежность, защищенность, безопасность и живучесть. Правильность решения каждого примера несложно проверить вручную. Убедившись же в достоверности получаемых при этом результатов, правомерно применить изложенный здесь подход для постановки и решения более сложных и высокоразмерных задач, связанных с системным исследованием человекомашинных систем в целях прогнозирования техногенного риска.

На этом завершим знакомство с общими принципами ручного и автоматизированного прогнозирования параметров риска техногенных чрезвычайных ситуаций и приступим к более детальному рассмотрению того, как эти базовые руководящие положения могут реализовываться в процессе моделирования с помощью перечисленных выше диаграмм типа «дерево», «граф» и «сеть». Более конкретная информация о программном комплексе «АРБИТР», официально допущенном к подобному прогнозу рассматриваемых здесь показателей реальных технических систем, приведена в приложении Е.1 к данной книге.

## Вопросы и задания для самопроверки

1. Перечислите основные этапы системного исследования происшествий в техносфере.
2. В чем заключается предназначение эмпирического системного анализа происшествий в техносфере?
3. Какова цель проблемно-ориентированного описания выбранных объекта и цели системного исследования техногенных происшествий?
4. Укажите основные задачи, решаемые в процессе теоретического системного анализа и системного синтеза безопасности в техносфере.
5. Какие модели и методы моделирования наиболее предпочтительны для системного исследования техногенных происшествий?
6. В чем заключаются основные достоинства моделирования с помощью диаграмм влияния?
7. Какие типы диаграмм причинно-следственных связей вам известны?
8. В чем состоит основное отличие диаграммы типа «дерево» от графа?
9. Чем отличается головное событие от центрального события диаграмм типа «дерево»?
10. Назовите типы сетей детерминистской и стохастической структуры.
11. Какие виды узлов используются в стохастических сетях типа GERT?
12. Что такое петля сети типа GERT и как определить ее порядок?
13. В каких сетях и зачем применяется окраска, т.е. разноцветность узлов?
14. На что указывает и где применяется число степеней свободы узла?
15. Чем отличаются типы узлов и дуг, используемых в одной и той же сети Петри?
16. Какие из рассмотренных в этой главе диаграмм причинно-следственных связей обладают наибольшими возможностями и почему?
17. Перечислите достоинства и этапы автоматизированного количественного анализа причинно-следственных диаграмм с помощью программного комплекса «АРБИТР».
18. Что означают термины «схема функциональной целостности» и «логический критерий функционирования»?
19. Какие типы узлов и дуг включают схемы функциональной целостности?
20. Перечислите состав показателей и параметров, применяемых в технологии АСЛМ.

**Ситуационная задача.** Используя символику параграфа 9.3, изобразите причинно-следственную модель опасного процесса, заданного следующей металингвистической формулой:

$$\langle \text{граф состояний-переходов} \rangle ::= \langle |U \wedge V \wedge \Omega \wedge F \wedge \Pi | \wedge |D \wedge A \wedge B \wedge P \wedge T| \rangle,$$

где  $U = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ;  $V = \emptyset$ ;  $\Omega = \emptyset$ ;  $F = \emptyset$ ;  $\Pi = \emptyset$ ;  $D = \emptyset$ ;  $A = \{A_1 = (2-1), A_2 = (1-2), A_3 = (1-3, 4-5), A_4 = (2-4, 3-4), A_5 = (4-5)\}$ ;  $B = \{B_1 = (1-2, 1-3), B_2 = (2-1, 2-4), B_3 = (3-4), B_4 = (4-5), B_5 = \emptyset\}$ ;  $P_{ij} = \{P_{12} = 0,3; P_{13} = 0,5; P_{21} = 0,1; P_{24} = 0,2; P_{34} = 0,3; P_{45} = 0,1\}$  и  $T = \emptyset$ .

**Системное  
прогнозирование  
параметров риска  
происшествий с помощью  
диаграмм типа «дерево»**

Рассматриваемые здесь причинно-следственные модели получили ныне самое *широкое* распространение при системном исследовании производственно-экологической безопасности с целью ручного и автоматизированного прогноза показателей надежности, живучести и параметров риска отказов и происшествий в различных человеко-машинных системах, что обусловлено их многими достоинствами. Поэтому материал данной главы достоин самого *углубленного* усвоения из-за его перспективности для последующей профессиональной деятельности в сфере менеджмента техногенного риска. Кроме того, конструктивность этих моделей демонстрируется далее в данном (гл. 13) и третьем (гл. 19—21) разделах книги.

**10.1. Правила построения диаграмм типа «дерево происшествия» и «дерево событий»**

Системное исследование наиболее опасных отказов и техногенных происшествий с помощью «дерева происшествия» (ДП) и «дерева событий» (ДС) включает следующие этапы:

1) предварительный анализ риска с целью выявления на ОПО его главных источников и способов проявления в форме каких-либо чрезвычайных ситуаций;

2) представление условий их возникновения в виде ДП, а развития — в виде ДС;

3) проведение качественного анализа каждой такой разработанной модели;

4) количественная оценка с их помощью вероятности исследуемого техногенного происшествия и размеров ожидаемого от него ущерба;

5) обоснование мероприятий по снижению только что оцененных мер возможности и результата проявления соответствующих источников техногенного риска.

Кратко рассмотрим особенности реализации четырех последних этапов, имея в виду, что проведение первого по методикам гл. 7 позволит выявить источники техногенного риска, требующие дополнительного исследования с целью принятия неотложных мер по его перераспределению или снижению.

Что касается построения древовидных моделей процессов появления и развития техногенных происшествий, то главная особенность данного этапа их системного исследования состоит в необходимости учета всех наиболее существенных факторов и отсутствии в настоящее время соответствующих строгих процедур. По этим причинам обычно не удастся обеспечить идентичность результатов моделирования одного и того же происшествия, полученных различными исследователями с целью прогноза соответствующих параметров и выработки рекомендаций по их оптимизации какими-либо способами.

Для упорядочения процедур построения ДП и ДС предлагается использование положений энергоэнтропийной концепции, касающихся основных закономерностей аварийности и травматизма в техносфере, в особенности того утверждения, что любое техногенное происшествие является одновременно и (1) следствием причинной цепи соответствующих предпосылок к началу аварийного высвобождения энергозапаса ОТУ, и (2) результатом последующего неконтролируемого истечения, распространения, трансформации и разрушительного воздействия соответствующих потоков на оказавшиеся вблизи объекты. Последовательно продемонстрируем конструктивность предложенного подхода, начиная с ДП.

В частности, из утверждения (1) следует, что при определении структуры дерева происшествия под его элементами нужно подразумевать следующее:

а) головное событие — начало нежелательного высвобождения конкретного вида энергии или вредного вещества;

б) ветви — минимально необходимые для этого причинные цепи предпосылок, каждая из которых состоит из событий, объединенных связями и логическими условиями;

в) исходные события-предпосылки, иногда называемые «листьями» ДП, в качестве которых обычно имеются в виду отказы техники,

ошибки людей, а также неблагоприятные (вредные, опасные или неожиданные) для них внешние воздействия.

Рекомендуется также не прямая, а обратная последовательность поиска подобных причинных цепей головного события. Иначе говоря, построение ДП следует начинать не снизу вверх (от инициирующих ошибок, отказов и неблагоприятных внешних воздействий — к головному событию), а наоборот. При этом головное событие, его возможные предпосылки и объединяющие их логические условия необходимо выявлять *дедуктивно*, т.е. руководствуясь общими закономерностями возникновения техногенных происшествий.

При выявлении соответствующих факторов нужно помнить, что основными источниками опасности в промышленности и на транспорте служат обращающиеся в их ОТУ вредные (в том числе перегретые и переохлажденные) вещества, а также источники электроэнергии, подвижное технологическое оборудование и сосуды, работающие под высоким давлением или вакуумом. Следовательно, возможные происшествия необходимо увязывать с нежелательным высвобождением подобного энергозапаса, а инициирующие это *технические* предпосылки — с отказами или неисправностью ответственных элементов оборудования вследствие естественного износа, старения или усталости; загрязнения, окисления, пересушки или переувлажнения под воздействием рабочей среды; неадекватных воздействий со стороны персонала.

Второй группой предпосылок техногенных происшествий следует считать *ошибочные и несанкционированные* действия, допущенные людьми при конструировании, изготовлении, монтаже, техническом обслуживании и ремонте технологического оборудования ОПО. Появление подобных предпосылок может быть обусловлено как внутренними (отсутствие должных психологических установок, знаний и навыков), так и внешними для человека факторами (несовершенство используемой техники и технологии, высокая напряженность труда или неблагоприятные условия рабочей среды).

При построении ДП также полезно руководствоваться следующими *правилами и рекомендациями*:

- а) четко определять условия появления головного события;
- б) декомпозировать сложные предпосылки до простых;
- в) уточнять время, место и причины возникновения каждой из них;
- г) выявлять совместно действующие факторы и разделять их;
- д) исключать обратные связи между элементами этой модели;
- е) увязывать события-инициаторы причинной цепи происшествия с внешними факторами;
- ж) указывать родовую принадлежность предпосылок: «отказ», «ошибка» или «воздействие извне»;

- з) конкретизировать причины их появления, например «вследствие удара» или «по причине захвата движущимися частями»;
- и) проверять достоверность всех принятых допущений и исходных данных.

Создание этой модели заканчивают проверкой полноты образующих ее элементов и связей между ними, а также алфавитно-цифровым кодированием всех событий. Иногда на данном этапе также составляют структурные функции (эквивалентные ДП выражения булевой алгебры). При их формировании осуществляются следующие замены: все предпосылки данной диаграммы — на их алфавитно-цифровые коды; узлы логического перемножения « $\times$ » и сложения «+» — на условия конъюнкции « $\wedge$ » и дизъюнкции « $\vee$ »; а имеющиеся в ней причинные цепи предпосылок — на дизъюнктивно-конъюнктивные соотношения типа ранее показанных в выражении (9.2).

Что касается дерева событий, то процедура его построения, основанная на втором (2) из ранее выбранных утверждений энерго-энтропийной концепции, во многом сходна с вышеизложенной. Действительно, ДС также строится сверху вниз, т.е. от центрального события к тем совокупностям учтенных им промежуточных и конечным исходов, которые соединены дугами. В качестве центрального события этой графической модели обычно берется головное событие конкретного ДП, что удобно для решения всех рассмотренных выше (см. на рис. 9.1 нижний блок) задач системного исследования. Ведь последующий совместный анализ этих двух диаграмм позволит выявлять закономерности появления и предупреждения конкретных происшествий, оценивать меры возможности и результата проявления соответствующих источников риска и обосновывать рациональные меры по его парированию.

Однако главным методом построения ДС будет уже *индукция*, т.е. воспроизведение лишь тех вариантов развития (сценариев проявления) моделируемого техногенного происшествия, которые не противоречат объективно существующим законам природы и наиболее вероятны в исследуемых условиях. Кроме того, все подобные сценарии нужно рассматривать как последовательности исходов завершения не менее чем на трех этапах данного довольно сложного, а значит — и случайного процесса:

- 1) истечение потоков энергии или вредного вещества, аварийно высвобождающихся из конкретного ОТУ;
- 2) их распространение от источника выброса до близлежащих незащищенных объектов, иногда — с учетом трансформации некоторых АХОВ в форме воспламенения или взрыва;
- 3) разрушительное воздействие первичных потоков или продуктов их интенсивной трансформации на соответствующие объекты из состава людских, материальных и природных ресурсов.

При этом следует определять следующие параметры:

- а) количество высвободившегося энергозапаса;
- б) размеры зон распространения и трансформации соответствующих потоков;
- в) мощность вызванных ими поражающих факторов;
- г) находящиеся в этих зонах людские, материальные, природные ресурсы и их стойкость к таким факторам;
- д) условные вероятности каждого учтенного в ДС исхода.

Из вышеизложенного следует, что в структуре каждого ДС должно быть не менее трех уровней. Первый из них предназначен для отражения вариантов аварийного истечения и оценки количества высвободившихся при этом энергии или вредного вещества, каждого — со своей вероятностью и средним объемом утечки. Основными учитываемыми здесь характеристиками следует считать объем накопленного в ОТУ энергозапаса, возможность ограничения его эмиссии предусмотренными для этого приборами безопасности, гидравлическое или иное сопротивление каналов утечки и наполняемой потоками среды и т.д.

Второй уровень ДС характеризует особенности неконтролируемого распространения в новой среде высвободившихся потоков энергии и вредного вещества. При этом учитывается возможность как их преобразования (например, испарения пролитого сжиженного газа или интенсивного горения либо мгновенного взрыва его паров), так и появления вторичных поражающих факторов подобной трансформации (осколков, теплового импульса, избыточного давления). Естественно, что все параметры данного уровня определяются количеством и видом аварийно высвободившегося энергозапаса, а также свойствами среды, в которой распространяются и накапливаются соответствующие вещества.

Наконец, на третьем уровне прогнозируется разрушительная работа высвободившихся потоков и сопутствующих им поражающих факторов, совершаемая с незащищенными от них объектами. Здесь рассматривается не только прямой ущерб людям, их имуществу и природной среде, но и косвенный, обусловленный нарушением существующих между ними связей. Размеры совокупного ущерба определяются с учетом уровней подобных факторов, образовавшихся в соответствующих зонах, а также плотности и стойкости подвергнутых их воздействию ресурсов, поглощенных ими доз энергии и вредного вещества, своевременности проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ.

Построение ДС — исходов конкретного техногенного происшествия — должно завершаться проверкой полноты учтенных вариантов истечения, распространения, трансформации и поглощения аварийно высвободившихся потоков. При этом следует руководствоваться

правилами определения и деления понятий на классы, рекомендуемые формальной логикой (см. гл. 1) и теорией вероятностей для независимых и зависимых событий. В частности, нужно контролировать указание не только родовой принадлежности всех конечных исходов ДС, (например, для людей это «гибель, увечье или временная потеря трудоспособности»), но и межвидовых отличий внутри рода (например, «вследствие ингаляции или адсорбции вредного вещества» или «воздействия воздушной ударной волны»).

Кроме того, в обозначении узлов ДС (да и ДП тоже) следует избегать использования на одном уровне событий, одно из которых является частью другого, а также не допускать как применения понятия с неясным содержанием, так и его раскрытия с помощью признаков, уже имеющихся в наименовании определяемого события, т.е. допускать ошибку, иногда называемую «круг в определении». Наконец, при выявлении логических условий и причинно-следственных связей между узлами обеих этих моделей следует руководствоваться соответствующими методами формальной логики [5]: остатков, сопутствующих изменений, единственного сходства, единственного различия и их комбинацией. Соблюдение этих правил обычно позволяет обеспечить требуемую адекватность построенных ДП и ДС, а стало быть — и их пригодность для последующего системного анализа и синтеза безопасности в техносфере.

## 10.2. Качественный анализ моделей типа «дерево»

Следующим (после построения ДП и ДС) этапом системного исследования техногенных происшествий служит предварительный анализ этих моделей. Его цель — уточнение закономерностей появления и исключения аварийности и травматизма при функционировании рассматриваемых ОПО, а также оценка вклада в это каждой предпосылки ДП и каждого исхода ДС на качественном уровне. К проведению такого анализа целесообразно приступать лишь после завершения проверки диаграмм типа «дерево» на полноту учета всех существенных факторов и правильность определения соответствующих элементов.

Кратко и последовательно сформулируем рекомендации по проведению качественного анализа рассматриваемых здесь диаграмм влияния, начиная с ДП. Причем сделаем это двумя способами:

- 1) с помощью так называемых минимальных сочетаний его исходных предпосылок;
- 2) путем оценки вклада каждого такого события и их сочетания в условия возникновения и гарантированного исключения моделируемого происшествия.



Что касается первого метода, то под *минимальным сочетанием* будем понимать наименьшее число тех случайных исходных событий ДП, наступление или отсутствие которых необходимо и достаточно для достижения какого-либо из заранее оговоренных результатов. Так как речь здесь идет о возникновении и предупреждении конкретных техногенных происшествий, то при качественном анализе соответствующей модели нужно иметь дело с двумя типами минимальных сочетаний<sup>1</sup> — так называемыми пропускным (аварийным) и отсечным (секущим).

Если конкретнее, то минимальное пропускное сочетание (МПС) включает в себя наименьшее число таких исходных предпосылок ДП, одновременное *появление* которых необходимо и достаточно для прохождения их сигнала к головному событию этой модели. Напротив, минимальное отсечное сочетание (МОС) формирует уже условия невозникновения соответствующего техногенного происшествия, а состоит оно из минимального числа тех исходных событий ДП, одновременное *непоявление* которых гарантирует отсутствие его головного события. Особенностью обоих минимальных сочетаний служит утрата присущих им свойств после удаления хотя бы одного события. Выявление же подобных сочетаний удобно проводить движением по этой модели сверху вниз, последовательно рассматривая во всех ее логических узлах условия, необходимые для прохождения сигнала от исходных предпосылок к ее головному событию — при выявлении МПС, и пресечения — для определения МОС.

Для иллюстрации качественного анализа ДП с помощью МПС и МОС воспользуемся рис. 10.1, одновременно интерпретирующим те условия, которые необходимы и достаточны для появления как несчастного случая на электроустановке, так и аварии с воспламенением паров водорода, выделяющихся при зарядке свинцовых аккумуляторов.

Головное событие  $X$  этой модели есть результат одновременного появления трех предпосылок верхнего уровня:  $I$  — появление потенциала высокого напряжения на корпусе электроустановки (накопление паров водорода в аккумуляторной станции);  $H$  — нахождение человека на токопроводящем основании (отсутствие вентиляции внутри этой станции);  $K$  — его прикосновение к такому же корпусу (появление в аккумуляторной источнике воспламенения). В свою очередь, предпосылка  $I$  явилась следствием возникновения любого из двух исходных событий:  $A$  — снижение сопротивления изоляции электроустановки (длительный заряд неисправных аккумуляторных батарей) и  $B$  — касание ее токоведущими частями металлического корпуса

<sup>1</sup> За рубежом эти сочетания обозначают словами *accident sets* и *cut sets* либо *minpaths* и *mincuts*, а некоторые отечественные ученые, например автор [12], — «минимальными путями к аварийному состоянию и безопасному функционированию».

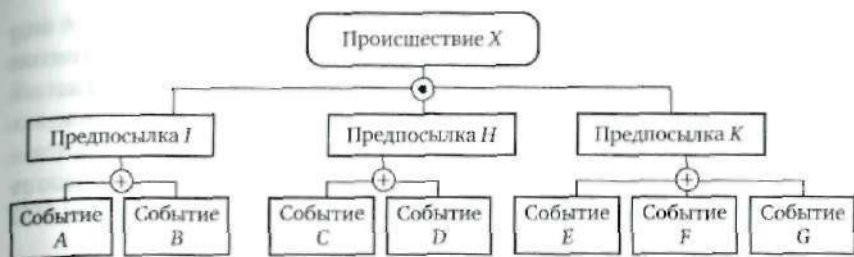


Рис. 10.1. Модель происшествия на ОПО в форме дерева

(отказ их зарядных устройств); предпосылка *H* была обусловлена *C* — нахождением человека на металлическом полу (поломкой вентиляторов аккумуляторной) либо *D* — его касанием заземленных элементов здания (закрытием ее воздуховодов); событие *K* стало следствием *E*, *F* либо *G* — ремонт, техническое обслуживание или использование электроустановки по прямому назначению (самовоспламенение промасленной ветоши, искрение электрооборудования либо появление в аккумуляторной людей с открытым огнем).

В действительности (что подтверждается рис. 10.1) любое ДП может иметь несколько минимальных сочетаний исходных предпосылок, наличие каждого из которых необходимо и достаточно либо для реализации, либо для непоявления головного события. Среди них могут быть МПС и МОС, состоящие лишь из одной исходной предпосылки — *синглеты*, из двух — *дуплеты*, из трех — *триплеты* и из большего их числа. Так, на рис. 10.1 имеется 12 МПС исходных событий: триплеты — *ACE*, *ACF*, *ACG*, *ADE*, *ADF*, *ADG*, *BCE*, *BCF*, *BCG*, *BDE*, *BDF*, *BDG* и три МОС таких событий: дуплеты — *AB*, *CD* и триплет *EFG*.

Другим способом качественного анализа ДП, уже позволяющим уточнять вклад отдельных предпосылок в условия появления и предупреждения конкретного головного события, является определение их значимости и критичности. Подобная оценка основана на рассмотрении логических узлов, объединяющих конкретную предпосылку со всеми ее событиями-источниками, а потому и влияющих на возможность как продвижения сигнала вверх по соответствующей причинной цепи, так и достижения им головного события этого дерева, т.е. на возникновение моделируемого происшествия.

Критерии же оценки подобного вклада исходных предпосылок таковы: чем выше, а значит, и ближе к головному событию ДП оказывается сигнал, распространяющийся от события по какой-либо ветви, тем больше значимость этой предпосылки — в смысле появления моделируемого происшествия. И наоборот, если возникновение предпосылки не приводит к заметному продвижению сигнала в сторону головного события, то это указывает на ее большую (в сравне-

нии с другими предпосылками) критичность, т.е. важность для поддержания уже безопасности того процесса, где возможно наступление исследуемого происшествия. Если же появление (непоявление) какой-либо предпосылки гарантирует (исключает) возможность возникновения происшествия, то такая предпосылка считается критически значимой (важной) для нарушения (сохранения) безопасности функционирования соответствующей человекомашиной системы или ОТУ в целом.

Например, в изображенном на рис. 10.1 ДП все его исходные события являются качественно равнозначными и равнокритичными, т.е. каждое из них обеспечивает одинаковый вклад в моделируемое техногенное происшествие. А вот на рис. 9.4, а более значимыми являются исходные предпосылки 1, 2, 3 левой ветви (их информация доходит почти до головного события), а более критичными — все четыре правой: отдельно взятые сигналы любого из них, упершись в логическое условие И, так и остаются без продвижения. Кроме того, каждое из событий группы 4—7 правомерно считать *критически важным*, но уже в смысле обеспечения безопасности, так как непоявление любого из них гарантирует невозможность наступления данного происшествия.

Что касается *косвенной* оценки вклада отдельных предпосылок с помощью уже полученных результатов качественного анализа ДП первым из только что рассмотренных способов, то о значимости/критичности этих событий можно судить также по частоте их включения в минимальные сочетания и общему числу предпосылок в них. Оказывается, что значимость исходного события пропорциональна количеству содержащих его МПС и обратно пропорциональна числу предпосылок в них. Подобная связь просматривается между МОС и критичностью исходных событий ДП, участвующих в их образовании.

Иногда целесообразно использовать также такие критерии оценки значимости и критичности исходных событий ДП, которые устанавливают уже количественную связь между мерами возможности возникновения отдельных исходных предпосылок этой модели или их минимальных сочетаний и такой же характеристикой моделируемого происшествия. При этом одни из количественных критериев могут указывать на изменение этих параметров головного события вследствие появления либо непоявления конкретных предпосылок и образуемых ими МПС (МОС), а другие — на ожидаемое среднее число техногенных происшествий, обусловленных появлением подобных событий и их сочетаний за конкретное время.

Наиболее предпочтительным для количественной оценки вклада конкретных предпосылок (либо их определенного минимального сочетания) в возникновение техногенного происшествия является критерий

рий Фусселя — Везели [16], характеризующий влияние факта их появления на прирост вероятности возникновения головного события ДП. Значения этого критерия  $\Lambda_i^{FV}$  и  $\Lambda_j^{FV}$ , определяемые при условии непо-явления происшествия до момента возникновения  $i$ -й исходной пред-посылки или  $j$ -го сочетания подобных исходных событий данной диа-граммы, рассчитываются по следующим формулам:

$$\Lambda_i^{FV} = P_i(\tau) / Q(\tau); \quad \Lambda_j^{FV} = \sum_{k=1}^n P_{jk}(\tau) / Q(\tau), \quad (10.1)$$

где  $P_i(\tau)$ ,  $Q(\tau)$  — соответственно вероятности наступления  $i$ -й предпо-сылки и появления моделируемого происшествия за некоторое время  $\tau$ ;  $P_{jk}(\tau)$ ,  $n$  — вероятности исходных событий ДП, принадлежащих его конкретному МПС, и их число в этом минимальном сочетании.

Уместно применение в рассматриваемых здесь моделях типа «дерево» и других способов количественной оценки вклада исход-ных предпосылок и образуемых ими причинных цепей предпосы-лок, например с помощью критериев Бирнбаума  $\Lambda_i^B$ , рассчитывае-мого либо взятием частной производной от  $Q(\tau)$  по  $P_i(\tau)$ , либо как разность между вероятностями головного события до и после появ-ления конкретных предпосылок или их подмножеств. Известен также критерий Барлоу — Прошана  $\Lambda_i^{BP}$ , выражаемый приростом числа техно-генных происшествий, ожидаемых в некоторый период из-за воз-никновения оцениваемых здесь исходных событий ДП или их мини-мальных сочетаний.

Говоря об особенностях оценки значимости и критичности элемен-тов ДП с помощью трех последних критериев, следует *помнить* о том, что их использование иногда может привести к ошибочным выводам. Дело в том, что значения  $\Lambda_i^{FV}$ ,  $\Lambda_i^B$  и  $\Lambda_i^{BP}$  зависят не только от вероятности предпосылок, но и от способа их соединения логическими условиями данной причинно-следственной диаграммы. Поэтому не исключены ситуации (например, при непродолжительной работе многократно резервированных технических систем), когда более высокой значи-мостью вначале обладают высоконадежные элементы, а уж затем — менее надежные.

Касаясь *прикладного аспекта* оценки значимости и критичности, отметим пригодность ее результатов для обоснования первоочередных мер по снижению меры возможности проявления источников техно-генного риска. В частности, наибольшую эффективность или эконо-мию средств обеспечивают организационно-технические меропр-ия, воздействующие на самые значимые исходные предпосылки. Например, с помощью рис. 9.4, а и формул типа (3.6), (3.7) нетрудно убедиться, что относительное снижение вероятности появления исход-ных событий 1 и 4 на одну и ту же величину окажется менее результа-

тивными для второго из них — за счет перемножения значений вероятностей (меньших единицы) возникновения этой и еще трех предпосылок 5—8. И наоборот, эффект от уменьшения вероятностей первых трех событий будет более весомым благодаря их не перемножению, а фактически сложению, что следует из формулы (3.7), когда ее параметры близки к нулю.

Кроме того, результаты оценки вклада исходных предпосылок и их сочетаний могут использоваться при назначении приоритетов технического обслуживания элементов ОТУ, а также обосновании требований к достоверности контроля эксплуатирующего персонала и параметров рабочей среды. Не менее важен учет значимости и критичности для оптимизации мероприятий по поддержанию требуемой безопасности технологического оборудования ОПО, что будет продемонстрировано ниже (см. гл. 19).

В завершение параграфа приведем краткие рекомендации, касающиеся уже качественного анализа ДС. Так как подробное рассмотрение его характеристик проводится в гл. 12—14, здесь ограничимся лишь правилами проверки некоторых параметров этой диаграммы и уточнением ее самых существенных признаков.

Во-первых, предпосылки каждого уровня ДС в совокупности обязаны представлять *полную группу* несовместных событий. Из этого следует, что данная модель должна учитывать все возможные варианты: а) истечения —  $\{1, \dots, l\}$ ; б) распространения и трансформации —  $\{1, \dots, m\}$ ; в) разрушительного воздействия —  $\{1, \dots, n\}$  аварийно высвободившихся потоков энергии и вещества. Иначе говоря, сумма безусловных вероятностей появления всех событий каждого из трех уровней ДС должна быть равна единице:

$$\sum_{i=1}^l Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^m Q_j^{(2)} = \sum_{k=1}^n Q_k^{(3)} = 1. \quad (10.2)$$

Во-вторых, все сценарии и события ДС, воспроизводящие условия причинения ущерба людским, материальным и природным ресурсам, следует идентифицировать по правилам формальной логики и теории вероятностей. В частности, это означает, что исходы всех трех уровней этой модели должны рассматриваться как независимые события, а их содержание — определяться после исследования всех альтернативных вариантов, с применением одного признака деления и соблюдением требования их непересекаемости на каждом уровне.

Как показывает опыт, использование перечисленных выше правил качественного анализа исследуемых здесь диаграмм может гарантировать приемлемую адекватность не только подобных моделей, но и вскрытых при этом закономерностей появления и предупреждения техногенных происшествий. Более того, соблюдение данных

условий позволит обеспечить в последующем достаточную точность не только прогноза техногенного риска, но и априорной количественной оценки эффективности мер по его снижению.

### 10.3. Количественный анализ диаграмм типа «дерево»

Данный этап системного исследования техногенных происшествий связан с прогнозированием меры возможности их появления и приближенной оценкой обусловленного этим ущерба. Так как точная априорная оценка подобных показателей для рассматриваемых здесь человекомашинных систем принципиально невозможна (см. параграф 4.4), то конечная цель проводимых здесь количественных расчетов будет состоять в обосновании наиболее эффективных организационно-технических решений по совершенствованию безопасности, в том числе с учетом того вклада исходных предпосылок ДП и конечных исходов ДС, который мог быть выявлен в ходе качественного анализа этих моделей.

Вместе с тем в ряде случаев самостоятельную ценность могут представлять и результаты предварительной оценки числовых характеристик рассматриваемых здесь диаграмм. Например, они будут полезными, когда нужно принять обоснованное решение о соответствии вероятности появления техногенных происшествий при функционировании какого-либо ОТУ ее требуемому значению или отдать предпочтение одному из подготовленных на конкурсной основе проектов какого-либо технического объекта, руководствуясь наименьшей величиной прогнозируемого в нем среднего ущерба.

Укажем рекомендации по требуемой в таких случаях количественной оценке параметров каждой из рассматриваемых здесь диаграмм влияния. При этом в качестве первоначальной информации будем использовать:

- а) для ДП — параметры  $P_i$ , характеризующие меру возможности возникновения каждой исходной предпосылки;
- б) для ДС — условные вероятности  $P_{ijk}$  появления всех его промежуточных и конечных событий, а также размеры ущерба  $Y_k$ , сопутствующего только конечным исходам этой модели.

Что касается количественного анализа ДП, то проводить его можно тремя различными способами. *Первый* из них основан на использовании структурных функций типа (9.2), порядок составления которых уже был рассмотрен выше, а его сущность состоит в упрощении подобных соотношений по правилам алгебры событий (см. табл. В.2 приложения) с целью получения расчетных вероятностных много-членов.

Второй способ связан с поэтапной и последовательной (снизу вверх) редукцией ДП путем выделения и сокращения количества тех имеющихся в нем подмножеств событий, которые объединены условиями логического перемножения и логического сложения. При оценке числовых характеристик трансформируемого этим способом дерева происшествия нужно руководствоваться следующими шестью основными правилами.

1. Объединенные логическим условием И  $n$  предпосылок ДП рекомендуется заменять одним событием с эквивалентной вероятностью появления  $P_K$ :

$$P_K = P_1 P_2 \cdots P_n = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (10.3)$$

2. Соединенные логическим условием ИЛИ  $m$  исходных предпосылок этого дерева также следует заменять одним событием, а его эквивалентную вероятность  $P_D$  рассчитывать по формуле, оценивающей вероятность реализации хотя бы одного исходного события:

$$P_D = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \cdots (1 - P_m) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i), \quad (10.4)$$

которая при  $m = 2$  и  $3$  принимает вид следующих зависимостей:

$$\begin{aligned} P_{D|m=2} &= P_1 + P_2 - P_1 P_2; \quad P_{D|m=3} = \\ &= P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_2 P_3 + P_1 P_2 P_3. \end{aligned} \quad (10.5)$$

3. Расчет вероятностей появления вершинных для блоков событий с соблюдением только что предложенных правил следует проводить до тех пор, пока не будет найдена вероятность появления головного события исходного ДП.

4. При оценке вероятностей отказов технологического оборудования ОТУ, являющихся исходными данными формул (10.3), (10.4), также следует строить «дерево отказа», используя для этого структурные схемы надежности: их параллельно соединенные элементы нужно объединять в нем логическим условием И, а последовательно соединенные — ИЛИ.

5. Если среди событий ДП, объединенных логическим условием И, одно из них имеет близкую к единице вероятность  $P_i$ , а остальные — вероятности, меньшие 0,01, то событие с большей вероятностью возникновения можно игнорировать.

6. При объединении логическим условием ИЛИ нескольких событий, одно из которых имеет близкую к нулю вероятность, а другие — на два-три порядка больше, уже нужно отбрасывать событие с малой вероятностью.

Третий способ количественной оценки вероятности  $Q$  головного события ДП основан на применении минимальных сочетаний исходных предпосылок, выявленных в процессе его качественного анализа. Основная его идея сводится к построению другой диаграммы, эквивалентной анализируемому ДП и включающей в себя все минимальные сочетания какого-либо одного типа. Эта новая диаграмма также является ДП и имеет лишь одно логическое условие: И, если используются только МОС, и ИЛИ, когда применяются лишь одни МПС.

Например, если в анализируемом ДП число МПС равно  $a$ , в каждом  $i$ -м из которых содержится  $m_i$  исходных событий, то его эквивалент (рис. 10.2, а) будет включать  $a$  исходных (промежуточных для прежнего дерева) предпосылок, объединенных логическим условием ИЛИ. При этом в каждом из  $a$  новых событий исходные предпосылки прежнего ДП будут соединены условием И. Если же дерево-оригинал содержит  $b$  штук МОС с  $n_k$  исходными событиями в каждом, то его эквивалент (рис. 10.2, б) объединит свои предпосылки условием И, а каждая из них будет образована логическим сложением исходных событий прежнего дерева.

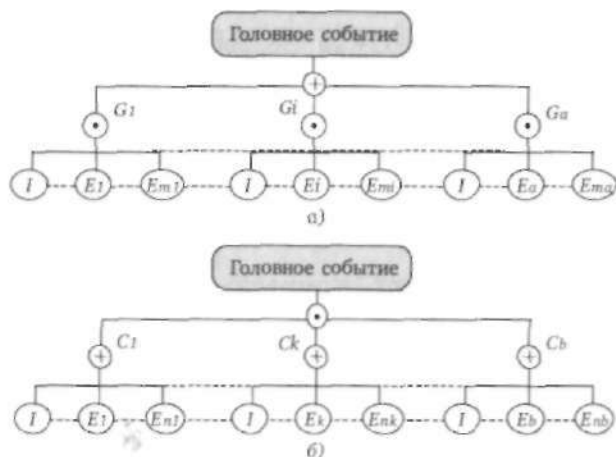


Рис. 10.2. Модификация исследуемого дерева происшествя:  
а — содержащего МПС; б — содержащего МОС

Из изложенного следует, что справедливы следующие выражения для вероятности  $Q$ :

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^a \left( 1 - \prod_{j=1}^{m_i} P_{ij} \right); \quad (10.6)$$

$$Q = \prod_{k=1}^b \left( 1 - \prod_{l=1}^{n_k} (1 - P_{kl}) \right); \quad (10.7)$$



где  $a, b$  — количество соответственно МПС и МОС анализируемого ДП;  $m_i, n_k$  — число исходных предпосылок в каждом его  $i$ -м МПС и  $k$ -м МОС;  $P_{ij}, P_{kl}$  — вероятности исходных событий, соответственно включенных в МПС и МОС.

В дополнение к только что изложенному рассмотрим еще один способ количественного анализа ДП, основанный на применении не точечных оценок вероятностей  $P_i, P_{ij}$  и  $P_{kl}$ , а нечетких чисел (см. параграф 2.1). Необходимость в этом возникает при прогнозировании техногенного риска в отсутствие достоверных данных по надежности принципиально нового технологического оборудования, а значит — безошибочности его персонала и неблагоприятного влияния на них рабочей среды. Идея метода связана с оперированием нечеткими числами, аппроксимированными функциями принадлежности  $L$ - $R$  типа [26] и последующим расчетом такой же (нечеткой) меры возможности головного события по известным для них правилам логического сложения и перемножения.

Пример подобного графического и аналитического выражения нечеткого числа  $\Sigma$  представлен на рис. 10.3, а основные правила алгебраических преобразований нечетких чисел этого типа — в табл. В.4 приложения.

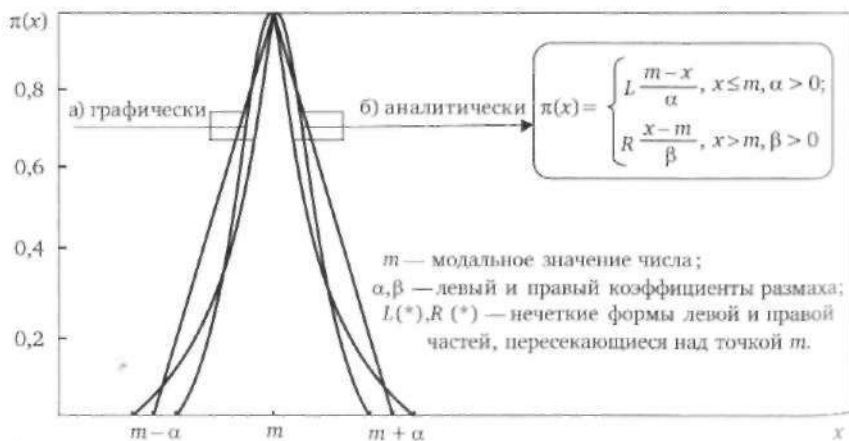


Рис. 10.3. Способы задания нечетких чисел, аппроксимированных  $L$ - $R$  формой

Обозначая представленные  $L$ - $R$  формой нечеткие числа в виде  $\Sigma = (m, \alpha, \beta)_{LR}$  и руководствуясь формулами табл. В.4, можно получить выражения для произведения и суммы нечетко заданных мер возможности появления предпосылок ДП. Например, для событий, объединенных условием логического перемножения И, справедливо выражение

$$\tilde{P}_{Y \otimes} = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = (m_{P_1}, \alpha_{P_1}, \beta_{P_1}) \otimes \dots \otimes (m_{P_{n-1}}, \alpha_{P_{n-1}}, \beta_{P_{n-1}}) \otimes \\ \otimes (m_{P_n}, \alpha_{P_n}, \beta_{P_n}) = (m_{P_1} m_{P_2} m_{P_3} \dots m_{P_{n-1}} m_{P_n}, \alpha_{P_1} + m_{P_1} \alpha_{P_2} + m_{P_1} m_{P_2} \alpha_{P_3} + \dots + m_{P_1} m_{P_2} \dots m_{P_{n-1}} \alpha_{P_n}, \beta_{P_1} + m_{P_1} \beta_{P_2} + m_{P_1} m_{P_2} \beta_{P_3} + \dots + m_{P_1} m_{P_2} \dots m_{P_{n-1}} \beta_{P_n}) |_{k=n}, \quad (10.8)$$

где  $\otimes$  — операция перемножения нечетких чисел;  $m_{r_i}$ ,  $\alpha_{r_i}$ ,  $\beta_{r_i}$  — соответственно модальное значение и коэффициенты размаха левой и правой ветви функции принадлежности нечеткого числа  $L$ - $R$  формы, значения которых рассчитываются по следующим рекуррентным соотношениям [52]:

$$m_{r_0} = m_{P_1}; \quad m_{r_1} = m_{P_1} m_{P_2}; \quad \dots; \quad m_{r_i} = m_{P_1} m_{P_2} \dots m_{P_{i+1}}; \\ \alpha_{r_0} = \alpha_{P_1}; \quad \alpha_{r_1} = m_{P_1} \alpha_{P_2} + m_{P_2} \alpha_{P_1}; \quad \dots; \quad \alpha_{r_i} = m_{P_1} \alpha_{P_{i+1}} + m_{P_{i+1}} \alpha_{P_1}; \\ \beta_{r_0} = \beta_{P_1}; \quad \beta_{r_1} = m_{P_1} \beta_{P_2} + m_{P_2} \beta_{P_1}; \quad \dots; \quad \beta_{r_i} = m_{P_1} \beta_{P_{i+1}} + m_{P_{i+1}} \beta_{P_1}. \quad (10.9)$$

Подобно проводится приближенная оценка меры возможности появления события, образованного с помощью логического условия ИЛИ:

$$\tilde{P}_{\oplus Y} = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = 1 - (m_{P_1} (1 - m_{P_1}) m_{P_2} + \\ + (1 - m_{P_1}) \alpha_{P_2} m_{P_1} \beta_{P_1} + (1 - m_{P_1}) \beta_{P_1}), \quad (10.10)$$

где  $\oplus$  — операция сложения нечетких чисел  $m_{r_i}$ ,  $\alpha_{r_i}$ ,  $\beta_{r_i}$  — упомянутые выше параметры нечетких мер возможности исходных предпосылок ДП, рассчитываемые по следующим формулам:

$$m_{r_0} = m_{P_1}; \quad m_{r_1} = (1 - m_{P_1})(1 - m_{P_2}); \quad \dots; \quad m_{r_i} = m_{P_{i+1}}(1 - m_{P_1}); \quad \alpha_{r_0} = \alpha_{P_1}; \\ \alpha_{r_1} = (1 - m_{P_1})\alpha_{P_2} + (1 - m_{P_2})\alpha_{P_1}; \quad \dots; \quad \alpha_{r_i} = m_{P_{i+1}}\alpha_{P_1} + (1 - m_{P_{i+1}})\alpha_{P_1}; \quad \beta_{r_0} = \beta_{P_1}; \\ \beta_{r_1} = (1 - m_{P_1})\beta_{P_2} + (1 - m_{P_2})\beta_{P_1}; \quad \dots; \quad \beta_{r_i} = m_{P_{i+1}}\beta_{P_1} + (1 - m_{P_{i+1}})\beta_{P_1}. \quad (10.10)$$

Учитывая, что работоспособность рассмотренных здесь способов точной и приближенной количественной оценки ДП будет продемонстрирована ниже на конкретных примерах, на этом завершим знакомство с ними и кратко изложим особенности проведения количественного анализа *дерева событий*. Его главные задачи обычно состоят в прогнозе среднего социально-экономического ущерба  $M_\tau(Y)$ , ожидаемого от появления конкретного происшествия, и обосновании наиболее эффективных мероприятий по его снижению, а общий подход к априорной оценке подобного ущерба с помощью рассматриваемых здесь диаграмм основан на использовании следующей расчетной формулы:

$$M_\tau(Y) = Q_{rc} \sum_{k=1}^n Q_k Y_k, \quad (10.12)$$

где  $Q_{тс}$  — вероятность возникновения исследуемого техногенного происшествия;  $n$  — число возможных сценариев его развития с причинением ущерба, учитываемых соответствующим ДС;  $Q_k, Y_k$  — условная вероятность реализации каждого конечного исхода этой модели и размеры связанного с ним социально-экономического ущерба.

Так как способы определения вероятности  $Q_{тс}$  только что рассмотрены, а порядок оценки двух последних параметров этой формулы излагается ниже, то здесь обратим внимание лишь на особенности решения задачи, связанной с обоснованием рациональных мероприятий по снижению ущерба от возможных техногенных происшествий. Необходимость в ее постановке и решении возникает в тех случаях, когда результаты априорной оценки  $M_{тс}(Y)$  не удовлетворяют каким-либо требованиям, например если значения вероятностей  $Q_{тс}, Q_k$  или ущерба  $Y_k$  на некоторых ОТУ превышают максимально допустимые значения.

При обосновании мер по снижению техногенного риска в таких случаях следует учитывать большое число соответствующих альтернатив: даже для двух мероприятий имеется четыре возможных решения: внедрить первое, второе, два вместе или отказаться от обоих. В этих условиях целесообразно оптимизировать принимаемые решения, например по минимуму затрат  $S$  на их реализацию либо по максимуму снижения вероятности  $Q_k$  появления самых тяжелых исходов или минимуму ущерба  $Y_k$  от них. Необходимые для этого исходные данные могут быть получены с помощью анализируемых здесь ДС.

Действительно, для определения эффекта  $\Delta M_{тс}(Y)$ , ожидаемого от внедрения, например, дополнительного средства защиты  $г$  и организационного мероприятия  $h$ , достаточно провести расчет по формуле (10.12), предварительно заменив сомножители ее правой части их снижением —  $\Delta Q_{kr}$  и  $\Delta Y_{kh}$ . Что касается оптимизации соответствующих решений, то для этого могут быть использованы следующие критерии:

а) наибольшее при выделенных затратах  $S_B$  снижение вероятности  $Q_{kr}$  или ущерба  $Y_{kh}$  от самых разрушительных сценариев высвобождения, распространения и поражающего воздействия аварийно высвободившегося энергозапаса ОТУ;

б) наименьшие суммарные затраты  $S_h$  и  $S_r$  на внедрение мероприятий, снижающих  $M_{тс}(Y)$  до приемлемого уровня.

## 10.4. Иллюстративные модели прогнозирования риска с помощью диаграмм типа «дерево»

Продемонстрируем работоспособность изложенных выше подходов к системному исследованию техногенных происшествий с помощью рассматриваемых диаграмм на трех примерах.

## Пример 1

Первая иллюстрация связана с прогнозированием риска аварии, вызванной проливом криогенного горючего при его перекачке по показанной на рис. 10.4 схеме.



Рис. 10.4. Блок-схема процесса перекачки криогенного горючего

Для демонстрации наиболее вероятных условий появления и развития выбранного для примера техногенного происшествия построена диаграмма типа «дерево», изображенная на рис. 10.5 и включающая в себя не только ДП (левая часть рисунка), но и ДС — его возможные исходы (правая часть). Причиной аварии считалось переполнение емкости указанным выше аварийно химически опасным веществом (АХОВ), несмотря на предотвращающие это технические средства и организационные мероприятия. В частности, для обеспечения безопасности рассматриваемого процесса предусмотрена система автоматической выдачи дозы (САВД) перекачиваемого горючего, срабатывающая по сигналу хронометра, расходомера или датчиков уровня. Кроме того, процесс заправки может быть прекращен оператором вручную — по достижении наперед заданного времени работы насосной установки.

При этом предполагалось, что переполнение и пролив криогенного АХОВ были вызваны несвоевременным отключением насосной установки. Наименования и коды событий-предпосылок соответствующего ДП, способных привести к исследуемому происшествию, приведены в табл. 10.1 совместно с вероятностями  $P_i$ ,  $i = 1, \dots, 13$ , исходных предпосылок. Имеющиеся вопросительные знаки указывают на необходимость оценки соответствующих параметров путем количественного анализа левой части приведенной модели.

Таблица 10.1. Предпосылки аварийного пролива АХОВ при его перекачке

Код	Наименование исходных и промежуточных событий	$P_i$
1	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объемной дозы	0,0005
2	Ослабление сигнала выдачи дозы (нерасчетные внешние помехи)	0,00001
3	САВД была отключена (ошибка контроля исходного положения)	0,0001

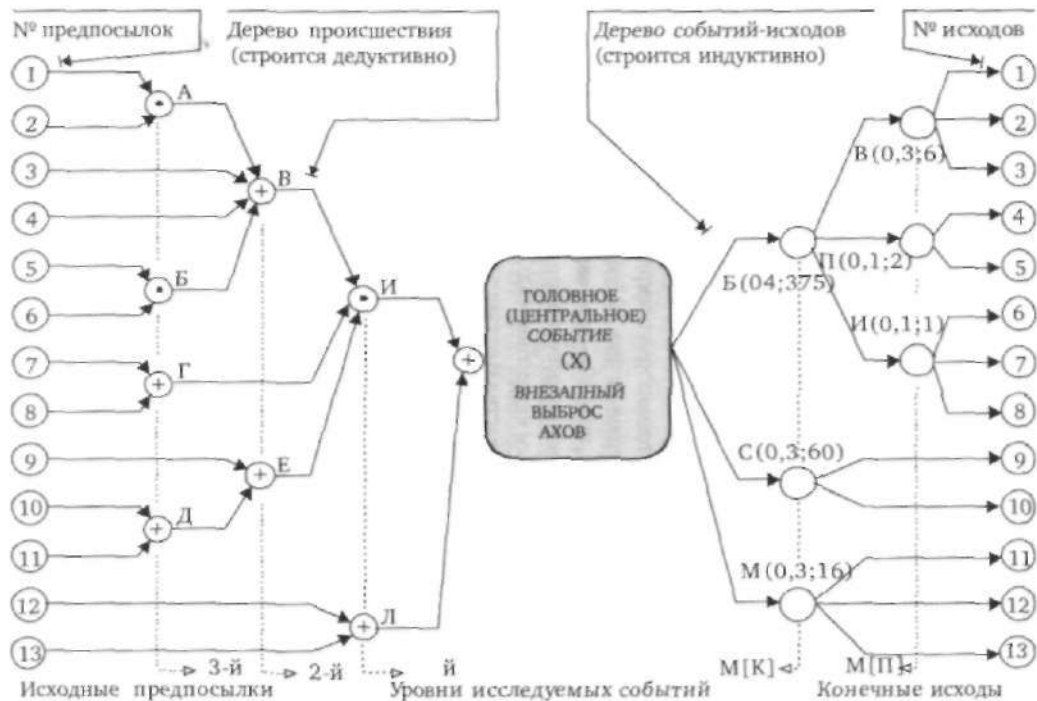


Рис. 10.5. Дерево происшествя и дерево событий

Код	Наименование исходных и промежуточных событий	$P_i$
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера (измерителя потока криогенного АХОВ)	0,0003
6	Отказ датчика уровня жидкости в заправляемой емкости	0,0002
7	Оператор не увидел световой индикации о неисправности САВД (ошибка человека)	0,005
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД (ошибка человека)	0,001
9	Оператор не знал о необходимости отключения насосов по истечению заданного времени	0,001
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени перекачки	0,004
11	Отказ датчика времени работы насосов (хронометра)	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насосов	0,00001
13	Обрыв цепей управления насосами перекачки АХОВ	0,00001
А	Отказ средств передачи сигнала от датчиков объемной дозы	?
Б	Отказ средств выдачи сигнала о величине объемной дозы	?
В	САВД не смогла выдать команду на отключение насосов	?
Г	Оператор не среагировал на неисправность САВД	?
Д	Оператор не среагировал на показания хронометра	?
Е	Оператор вовремя не пытался отключить насосную установку	?
И	Команда на отключение насосной установки не поступала	?
Л	Команда на отключение насосов не выполнена	?

Изображенное на рис. 10.5 ДП строилось от головного события  $X$  к вероятным предпосылкам первого, второго, третьего и исходного (левого на рис. 10.5) уровней. При моделировании условий, необходимых и достаточных для разгерметизации заправляемой емкости, учтены две причины первого уровня: И — неотключение насосов из-за отсутствия соответствующей команды; Л — ее неисполнение. Каждая из этих причин вызвана двумя предпосылками: 12, 13 — отказом выключателя или обрывом цепи управления насосной установкой, рассматриваемыми для отказа Л как исходные события, и В, Е — соответственно невыдачей нужной команды автоматикой и человеком-оператором.

В свою очередь обе причины второго уровня В, Е также были обусловлены двумя предпосылками третьего уровня: А, Б — отказ средств выдачи или доведения команды на отключение насосов и Г, Д — оператор не заметил этого сигнала или не смог их отключить. Кроме того, их появлению предшествовали три исходных события ДП: 3, 4, 9 — САВД оказалась отключенной; усилитель-преобразователь сигналов от ее датчиков был неисправным; оператор не знал о необходимости отключения насосов вруч-

ную, руководствуясь соответствующими показаниям хронометра. Наконец, каждая из четырех предпосылок третьего уровня могла быть вызвана также двумя исходными событиями: 1, 2 — обрыв цепей, ослабление сигнала; 5, 6 — неисправности датчиков уровня и расхода перекачиваемого АХОВ; 7, 8 — отказ усилителей-преобразователей их сигналов и 10, 11 — ошибки восприятия и дешифровки поступающей информации оператором, нерасчетные внешние воздействия на САВД.

Правая часть рис. 10.5 — ДС — синтезировалось также последовательно: от центрального события X к возможным сценариям, отличающимся количеством пролитого АХОВ, способами его распространения и возможной трансформации, результатами разрушительного воздействия соответствующих потоков на незащищенные от них объекты из состава людских, материальных и природных ресурсов. При этом ДС содержит три уровня: а) истечение б) распространение и трансформация пролитого АХОВ; в) разрушительное воздействие обусловленных этим опасных факторов с выбранными для примера 13-ю конечными исходами. На первом уровне учтены объемы пролива: Б, С, М — большой, средний и малый, соответственно вызванные разрушением заправляемой емкости, образованием в ней трещины и срабатыванием дренажно-предохранительного клапана. На втором уровне учтены варианты трансформации пролитого АХОВ: И — его испарение, П — пожар и В — взрыв образовавшегося при этом облака ТВС. На третьем уровне учтены последствия разрушительного воздействия соответствующих факторов на людские, материальные и природные ресурсы: а) при большом проливе: 1—3 — для взрыва образовавшейся при этом топливовоздушной смеси; 4, 5 — при ее воспламенении (пожаре) и 6—8 — в случае испарения; б) для среднего — 9, 10 и в) для малого пролива АХОВ — 11—13.

Цифры в скобках на ряде ветвей ДС соответствуют следующим параметрам: первый уровень ДС — вероятности трех видов разгерметизации заправляемой емкости и объемы высвободившегося при этом АХОВ; второй уровень — вероятности способов его трансформации (взрыв, пожар, испарение) и размеры ожидаемых при этом зон поражения<sup>1</sup>.

Далее на основе рассматриваемого примера рассмотрим *апробацию методов качественного и количественного анализа* происшествий на основе диаграмм типа «дерево».

В ходе качественного анализа данного ДП выявлено 27 МПС: два синглета — 12 и 13; двадцать дуплетов — 3, 7; ...; 4, 11; пять триплетов — 5, 6, 7; ...; 5, 6, 11, а также три МОС: 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13; 1, 2, 3, 4, 6, 12, 13 и 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14. Анализ же вклада исходных событий этой модели показал, что для пролива АХОВ наиболее значимыми являются две предпосылки — 12 и 13; наиболее критичны для его исключения тоже две — 5 и 6; вклад

<sup>1</sup> Порядок определения перечисленных здесь зон и их параметров будет подробно рассмотрен в конце этого раздела (см. параграф 15.3).

же остальных девяти исходных событий-предпосылок можно считать качественно равнозначным.

Дополнительные выводы были получены при количественном анализе ДП, проведенном с целью прогноза вероятности  $Q(X)$  его головного события двумя способами. В первом из них использовались уже выявленные МПС, МОС и формулы (10.6), (10.7) при  $a = 27$ ;  $m_i = 2, i = 1, \dots, 20$ ;  $m_i = 3, i = 21, \dots, 25$  и  $m_i = 1, i = 26, 27$ ;  $b = 3, n_k = 7$  для всех  $k$ . Например, подстановка части этих параметров в уравнение (10.6) дала следующий результат:

$$Q(X) = [(1 - (1 - P_3)(1 - P_2)(1 - P_1)(1 - P_4)(1 - P_5)(1 - P_{12})(1 - P_{13})) \times \\ \times [(1 - (1 - P_3)(1 - P_2)(1 - P_1)(1 - P_4)(1 - P_6)(1 - P_{12})(1 - P_{13})) \times \\ \times [(1 - (1 - P_7)(1 - P_8)(1 - P_9)(1 - P_{10})(1 - P_{11})(1 - P_{12})(1 - P_{13}))] \approx \\ \approx 0,000023, \quad (10.13)$$

где  $Q(X)$  и  $P_i, i = 1, \dots, 13$ , — соответственно вероятности происшествия и исходных предпосылок ДП, содержание и величина которых приведены в табл. 10.1.

Примерно этот же результат получается и при применении формулы (10.7):

$$Q(X) = 1 - [(1 - (1 - P_3P_7)(1 - P_3P_8)(1 - P_3P_{10})(1 - P_3P_{11})(1 - P_2P_7)(1 - P_2P_8) \times \\ \times (1 - P_2P_9)(1 - P_2P_{10})(1 - P_2P_{11})(1 - P_1P_7)(1 - P_1P_8)(1 - P_1P_9)(1 - P_1P_{10}) \times \\ \times (1 - P_1P_{11})(1 - P_4P_7)(1 - P_4P_8)(1 - P_4P_9)(1 - P_4P_{10})(1 - P_4P_{11})(1 - P_5P_6P_7) \times \\ \times (1 - P_5P_6P_8)(1 - P_5P_6P_9)(1 - P_5P_6P_{10})(1 - P_5P_6P_{11})(1 - P_{12}) \times \\ \times (1 - P_{13})] \approx 0,000023. \quad (10.14)$$

Во втором случае использовалась структурная функция, эквивалентная анализируемому ДП и полученная путем его дальнейшей формализации:

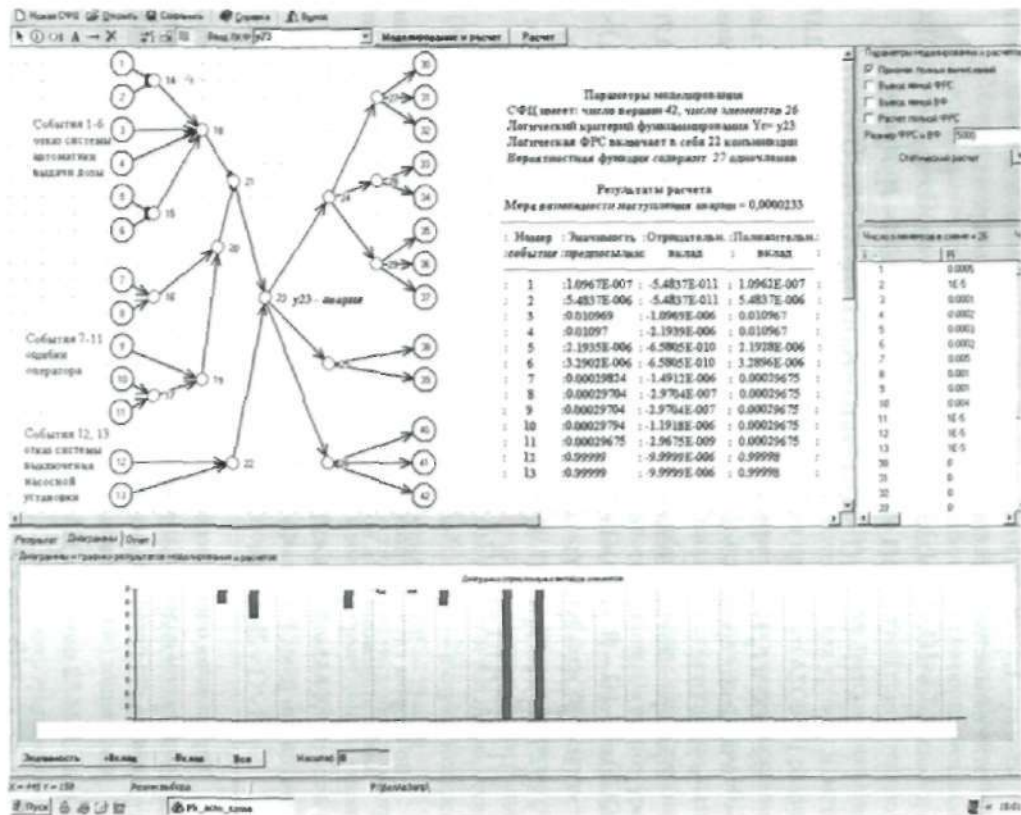
$$X = И \vee Л = (В \wedge Е) \vee Л = [(А \vee 1 \vee 4 \vee Б) \vee (Г \vee Д)] \vee Л = \\ = [3 \vee (1 \vee 2) \vee 4 \vee (5 \wedge 6)] \wedge [(7 \vee 8) \vee (9 \vee Д)] \vee Л = \\ = [3 \vee (1 \vee 2) \vee 4 \vee (5 \wedge 6)] \wedge [(7 \vee 8) \vee 9 \vee (10 \vee 11)] \vee (12 \vee 13). \quad (10.15)$$

Упрощенная оценка вероятности  $Q(X)$  осуществлена после замены в этом выражении кодов предпосылок их вероятностями  $P_i$  и численными значениями, что позволило получить выражение, с помощью которого получено следующее (завышенное) значение этой вероятности:

$$Q(X) \approx (P_1P_2 + P_3 + P_4 + P_5P_6) \times \\ \times (P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11}) + P_{12} + P_{13} \approx 0,000029. \quad (10.16)$$

Точный же прогноз  $Q(X)$  с помощью соответствующего расчетного многочлена, полученного свертыванием формулы (10.15) по правилам алгебры событий и последующих вычислений, был осуществлен с помощью программного комплекса «АРБИТР». Его интерфейс с исходными данными и частью результатов количественного анализа ДП изображен на рис. 10.6.





В левой верхней части этого рисунка изображена схема функциональной целостности, аналогичная диаграмме рис. 10.5, но выполненная в символической форме рис. 9.6; в правой средней и верхней частях — ее некоторые исходные данные; в центре и нижней части — результаты оценки меры возможности (вероятности) аварии и влияния всех исходных предпосылок соответствующего ДП — цифрами и гистограммой. При этом их значимость оценивалась по критерию Бирнбаума; вклады: отрицательный — по изменению вероятности появления аварии при увеличении этого же параметра предпосылки от исходного значения до единицы, а положительный — при уменьшении ее вероятности до нуля.

Сопоставление приведенных здесь сведений с результатами предыдущего качественного и количественного анализа показало их хорошее совпадение: число МОС (27 штук) соответствует количеству слагаемых вероятностной функции, а разница между точным (0,000023) и приближенным (0,000029) значениями  $Q(X)$  не превышает 25%.

Автоматизация проводимого здесь количественного анализа также возможна и при расчетах  $Q(X)$  по формулам типа (10.6) и (10.7), что достигается путем численного кодирования учитываемых ими МОС и МПС. Один из способов подобного кодирования показан на рис. 10.7 с помощью таблицы, символом  $\oplus$  в которой обозначена принадлежность исходного события ДП к конкретному минимальному сочетанию, а содержание ее переменных  $i, j, k, l, a$  и  $b$  раскрыто в комментарии к только что упомянутым формулам.

Данная таблица поясняет идею кодирования параметров формул (10.6) и (10.7) применительно к ДП, представленному в левой части рис. 10.5:

Номер предпосылки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
№ событий, образующих минимальные сочетания	j = 1	$m_i = 2$	$\oplus$					$\oplus$							
		$m_i = 2$	$\oplus$						$\oplus$						
		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	j = 2	$m_i = 2$		$\oplus$					$\oplus$						
		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		$m_i = 2$		$\oplus$									$\oplus$		
	j = 5	$m_i = 3$					$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$						
		$m_i = 3$					$\oplus$	$\oplus$					$\oplus$		
		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	j = 26	$m_i = 1$												$\oplus$	
		a = 27	$m_o = 1$												$\oplus$
	Очевидное	k = 1	$l_k = 7$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$						$\oplus$	$\oplus$
k = 2		$l_k = 7$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$		$\oplus$					$\oplus$	$\oplus$	
b = 3		$l_b = 7$							$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	

Рис. 10.7. Матричный способ представления минимальных сочетаний

каждая ее строка ( $j$ -е или  $k$ -е подмножество исходных предпосылок, т.е. МПС и МОС) может быть уподоблена вектору двоичных чисел, а затем и выражена одним десятичным числом. Например, первое МПС (см. верхнюю строку этой таблицы) образуется двумя исходными событиями 1 и 7, что эквивалентно вектору из 13 двоичных цифр 1000001000000 или десятичному числу, равному  $2^{12} + 2^6 = 4096 + 64 = 4160$ .

Подобным образом могут быть закодированы остальные МПС и МОС, а их наборы — соответствующим кортежем. Для МПС он будет включать 27 (в рассматриваемом случае) десятичных цифр: (4160, 4128, 4112, 4104, 4100, 2112, 2080, 2064, 2056, 2052, 1088, 1056, 1040, 1032, 1028, 576, 544, 528, 520, 516, 448, 416, 400, 392, 388, 2, 1), а для МОС — следующие три: (7939, 7811, 255).

Данная кодировка МПС и МОС использована при разработке компьютерной программы расчета вероятности  $Q(X)$ , работоспособность которой при оценке эффективности взятых для примера альтернативных мероприятий, понижающих вероятности 13 исходных событий ДП, подтверждена табл. 10.2.

Значения вероятностей исходных предпосылок ДП для нулевой (начальной для анализа) и последующих (взятых для примера) альтернатив приведены в соответствующих строках исходных данных. Другими сведениями, необходимыми для оценки вероятности  $Q(X)$  и эффективности альтернатив  $\Delta Y_k$ , служат коды МОС и МПС, средний ущерб  $Y$  от возможного происшествия, а также затраты  $S_k$ , требуемые для внедрения каждой из 13 альтернатив. Последние данные представлены в нижней части табл. 10.2:  $S_k$  — в третьей колонке, а ожидаемые от внедрения альтернатив эффекты: абсолютный (снижение  $\Delta Q_k$ ) и удельный — в четвертой и пятой. Удельный эффект рассчитывался делением  $\Delta Y_k$  на затраты  $S_k$ , а значения  $\Delta Y_k$  определялись перемножением  $\Delta Q_k$ , найденных вычитанием из начального значения  $Q(X)$  ее последующих значений, на  $Y$ .

Как следует из приведенного отчета, при прогнозе техногенного риска использованы десятичные коды обоих типов минимальных сочетаний: МОС — три первые цифры, а МПС — последние 28. Из оцененных альтернатив могут быть выбраны те, которые должны рассматриваться как оптимальные по минимуму затрат либо максимуму эффекта. Последовательность их синтеза будет проиллюстрирована ниже (см. параграф 19.3) с помощью конкретных примеров и постановок соответствующих оптимизационных задач.

## Пример 2

Второй (из объявленных в начале параграфа) пример иллюстрирует возможности нечеткого подхода к приближенному количественному анализу ДП с помощью модели [52], изображенной на рис. 10.8, которая интерпре-



Рис. 10.8. Дерево происшествия — несчастного случая

тирует условия появления несчастного случая при выполнении ремонтных работ на одном из химически опасных ОТУ.

Что касается алфавитных кодов и наименования исходных предпосылок рассматриваемого здесь техногенного происшествия, а также нечетких мер возможности  $P_i$  их появления (модальные значения и коэффициенты размаха ветвей), то они представлены в табл. 10.3.

Меры возможности появления всех предпосылок представлены в этой таблице нечеткими числами, аппроксимированными следующей L-R формой [26]:

$$P_i = \Sigma(m_i, \alpha, \beta)_{L,R} = \begin{cases} L\left(\frac{m_i - x}{\alpha_i}\right) = \frac{1}{1 + \left|\frac{m_i - x}{\alpha_i}\right|}, & x < m_i; \\ R\left(\frac{x - m_i}{\beta_i}\right) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x - m_i}{\beta_i}\right|}, & x > m_i. \end{cases} \quad (10.17)$$

Каждая такая форма (см. рис. 10.3) характеризовалась симметричными (относительно модальной величины  $m_i$ ) и равными между собой коэффициентами  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  размаха восходящей (левой L) и нисходящей (правой R) ветвей соответствующей функции принадлежности. Кроме того, предполагалось, что мера возможности  $Poss(*)$  появления всех предпосылок ДП монотонно изменяется от единицы (для точки пересечения  $x_i = m_i$  ветвей функции принадлежности соответствующего нечеткого числа) до значения, равного 0,1, при отклонениях аргумента  $x$  в обе стороны на половину величины  $m_i$ , т.е. соблюдалось следующее условие:

$$Poss(x = 0,5m_i) = Poss(x = 1,5m_i) = 0,1. \quad (10.18)$$

Таблица 10.2. Фрагмент отчета с исходными данными и результатами расчета

**Задача № 1. Оценка эффективности мероприятий по предупреждению аварийности и травматизма (априорно с помощью модели типа «дерево происшествия»)**

Исходные данные:

Тип происшествия — авария с проливом АХОВ

Ожидаемый средний ущерб — 1 000 000

Количество исходных предпосылок — 13

Код МОС — 7939, 7811, 255; код МПС — 1, 2, 388, 392, 400, 416, 448, 516, 520, 528, 544, 576, 1028, 1032, 1040, 1056, 1088, 2052, 2056, 2064, 2080, 2112, 4100, 4104, 4112, 4128, 4160

№	Вероятности исходных событий-предпосылок												
	0	0,0005	0,00001	0,0001	0,0002	0,0003	0,0002	0,005	0,001	0,001	0,004	0,00001	0,0005
1	0,0004	0,00001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,004	0,001	0,001	0,003	0,00001	0,0005	0,0004
2	0,0003	0,00001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,003	0,001	0,001	0,002	0,00001	0,0004	0,0004
3	0,0003	0,00001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,00001	0,0003	0,0005
4	0,0003	0,00001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,00001	0,0004	0,0004
5	0,0002	0,00001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,001	0,010	0,001	0,003	0,00001	0,0003	0,0003
6	0,0002	0,00001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,00001	0,0001	0,0002
7	0,0003	0,00001	0,0001	0,0002	0,0003	0,0001	0,002	0,002	0,001	0,003	0,00001	0,0002	0,0004
8	0,0004	0,00001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,00001	0,0003	0,0002
9	0,0003	0,00001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,003	0,001	0,001	0,003	0,00001	0,0004	0,0004
10	0,0002	0,00001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0002	0,010	0,003	0,001	0,001	0,00001	0,0002	0,0005
11	0,0005	0,00001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,003	0,001	0,001	0,002	0,00001	0,0002	0,0001
12	0,0004	0,00001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,003	0,003	0,001	0,003	0,00001	0,0004	0,0001
13	0,0002	0,00001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,003	0,004	0,001	0,002	0,00001	0,0005	0,0003

Окончание табл. 10.2

Результаты решения:

Альтернатива	Вероятность	Требуемые затраты	Ожидаемый эффект	Удельный вклад
0	0,00000230			
1	0,00000204	123	0,00000260	0,2110
2	0,00000151	2340	0,00000079	0,0033
3	0,00000182	1430	0,00000048	0,0034
4	0,00000205	980	0,00000025	0,0089
5	0,00000103	5420	0,00000127	0,0023
6	0,00000092	9080	0,00000138	0,0015
7	0,00000100	5020	0,00000130	0,0025
8	0,00000070	7280	0,00000160	0,0022
9	0,00000100	3840	0,00000130	0,0033
10	0,00000090	4305	0,00000140	0,0032
11	0,00000086	9120	0,00000144	0,0015
12	0,00000120	7240	0,00000110	0,0042
13	0,00000190	2560	0,00000040	0,0015

Таблица 10.3. Наименования и параметры предпосылок к несчастному случаю

Код	Исходные события-предпосылки	$m_i$	$\alpha_i = \beta_i$
A	Оператор 1-го реактора работает без противогаза	0,02	$1,112 \cdot 10^{-3}$
B	Оператор 2-го реактора работает без противогаза	0,02	$1,112 \cdot 10^{-3}$
C	Утечка АХОВ из первой каталитической установки	0,80	$4,448 \cdot 10^{-2}$
D	Утечка АХОВ из второй каталитической установки	0,80	$4,448 \cdot 10^{-2}$
E	Вытяжная вентиляция помещения отсутствует	1,00	$5,566 \cdot 10^{-2}$
F	В помещение входят сменные рабочие	0,05	$2,778 \cdot 10^{-3}$
G	В помещение входит оперативный персонал цеха	0,05	$2,778 \cdot 10^{-3}$
H	В помещение входят иные лица без средств защиты	0,01	$5,560 \cdot 10^{-4}$

Иначе говоря, вероятность того, что мера возможности появления всех исследуемых событий ДП отклоняется, например, от заданных в табл. 10.3 ее средних значений  $m_i$  на  $\pm 50\%$ , не превышает 10%.

При принятых выше упрощающих допущениях<sup>1</sup> подстановка значения меры возможности  $Poss(x_i = m_i \pm 0,5m_i) \leq 0,1$  в формулу (10.17) дает следующее выражение:

$$1 + \frac{|m_i - x|}{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha + 0,5m} \leq 0,1, \quad (10.19)$$

из которого следует, что  $\alpha_i = \beta_i = 0,0556m_i$ . Именно так и были получены величины размаха всех нечетких чисел, приведенные в правой части табл. 10.3.

Для априорной оценки меры возможности появления рассматриваемого здесь несчастного случая с помощью рис. 10.8 были составлены следующие структурные формулы:  $K = F \vee G \vee H$ ;  $L = C \vee D$ ;  $M = E \wedge K \wedge L$ ;  $X = A \vee B \vee M$  и соответствующие им упрощенные расчетные многочлены:  $P_X = P_A + P_M + P_B$ ;  $P_M = P_L \times P_K \times P_E$ ;  $P_L = P_C + P_D$ ;  $P_K = P_F + P_G + P_H$ . Затем, в соответствии с уравнениями (10.8) — (10.11) нетрудно получить выражения для рекурсивных множителей  $m_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ , необходимых для расчета модального значения меры возможности двух предпосылок ( $L, K$ ) второго и одной ( $M$ ) первого уровней ДП.

Например, вычисления по формулам (10.10), (10.11) параметров  $m_K$  и  $\alpha_K = \beta_K$  нечеткой возможности появления события  $K$  привели к следующим результатам:

<sup>1</sup> Еще один пример подобной аппроксимации таких, в действительности неизвестных, функций будет рассмотрен несколько ниже (см. параграф 12.4).

$$m_{\eta} = 1 - (1 - m_F)(1 - m_G) = 1 - (1 - 0,05)(1 - 0,05) = 0,097;$$

$$m_K = 1 - (1 - m_{\eta})(1 - m_H) = 1 - (1 - 0,097)(1 - 0,01) = 0,106;$$

$$\alpha_{\eta} = (1 - m_F)\alpha_G + (1 - m_G)\alpha_F = (1 - 0,05)0,003 + (1 - 0,05)0,003 = 0,0057;$$

$$\alpha_K = \beta_K = (1 - m_{\eta})\alpha_H + (1 - m_H)\alpha_{\eta} = (1 - 0,097) \cdot 0,001 + \\ + (1 - 0,01) \cdot 0,0057 = 0,0056,$$

т.е. мера возможности  $P_K$  появления в опасной зоне посторонних лиц равна нечеткому числу

$$P_K = (m_K, \alpha_K, \beta_K) = (0,106; 0,0056; 0,0056). \quad (10.20)$$

Подобным образом найдены нечеткие параметры меры возможности возникновения второго промежуточного события  $L$  (появления опасной зоны вокруг двух реакторов):

$$m_L = 1 - (1 - m_C)(1 - m_D) = 1 - (1 - 0,8)(1 - 0,8) = 0,960;$$

$$\alpha_L = \beta_L = (1 - m_C)\alpha_D + (1 - m_D)\alpha_C = \\ = (1 - 0,8) \cdot 0,045 + (1 - 0,8) \cdot 0,045 = 0,018;$$

$$P_L = (m_L, \alpha_L, \beta_L) = (0,960; 0,018; 0,018).$$

С помощью формул (10.8), (10.9) и табл. 10.3 получены подобные оценки также и для предпосылки  $M$ :

$$m_{\tau_1} = m_E m_K = 1,0 \cdot 0,106 = 0,106; \quad m_M = m_{\tau_1} m_L = 0,106 \cdot 0,96 = 0,102;$$

$$\alpha_{\tau_1} = m_E \alpha_K + m_K \alpha_E = 1,0 \cdot 0,004 + 0,106 \cdot 0,56 = 0,010;$$

$$\alpha_M = \beta_M = m_{\tau_1} \alpha_L + m_L \alpha_{\tau_1} = 0,106 \cdot 0,018 + 0,96 \cdot 0,01 = 0,012;$$

$$P_M = (m_M, \alpha_M, \beta_M) = (0,102; 0,012; 0,012).$$

Наконец, после подстановки в (10.10), (10.11) только что полученных данных о нечетких параметрах исходных предпосылок  $A$  и  $B$  найдена мера возможности возникновения рассматриваемого несчастного случая:

$$m_{\tau_1} = 1 - (1 - m_A)(1 - m_B) = 1 - (1 - 0,02)(1 - 0,02) = 0,039;$$

$$m_X = 1 - (1 - m_{\tau_1})(1 - m_M) = 1 - (1 - 0,039)(1 - 0,102) = 0,138;$$

$$\alpha_{\tau_1} = (1 - m_A)\alpha_B + (1 - m_B)\alpha_A = (1 - 0,02) \cdot 0,011 + \\ + (1 - 0,02) \cdot 0,011 = 0,022;$$

$$\alpha_X = \beta_X = (1 - m_{\tau_1})\alpha_M + (1 - m_M)\alpha_{\tau_1} = (1 - 0,039) \cdot 0,012 + \\ + (1 - 0,102) \cdot 0,022 = 0,032;$$

$$P_X = (m_X, \alpha_X, \beta_X) = (0,138; 0,032; 0,032).$$

Таблица 10.3. Наименования и параметры предпосылок к несчастному случаю

Код	Исходные события-предпосылки	$m_i$	$\alpha_i = \beta_i$
A	Оператор 1-го реактора работает без противогаса	0,02	$1,112 \cdot 10^{-3}$
B	Оператор 2-го реактора работает без противогаса	0,02	$1,112 \cdot 10^{-3}$
C	Утечка АХОВ из первой каталитической установки	0,80	$4,448 \cdot 10^{-2}$
D	Утечка АХОВ из второй каталитической установки	0,80	$4,448 \cdot 10^{-2}$
E	Вытяжная вентиляция помещения отсутствует	1,00	$5,566 \cdot 10^{-2}$
F	В помещение входят сменные рабочие	0,05	$2,778 \cdot 10^{-3}$
G	В помещение входит оперативный персонал цеха	0,05	$2,778 \cdot 10^{-3}$
H	В помещение входят иные лица без средств защиты	0,01	$5,560 \cdot 10^{-4}$

Иначе говоря, вероятность того, что мера возможности появления всех исследуемых событий ДП отклоняется, например, от заданных в табл. 10.3 ее средних значений  $m_i$  на  $\pm 50\%$ , не превышает 10%.

При принятых выше упрощающих допущениях<sup>1</sup> подстановка значения меры возможности  $Poss(x_i = m_i \pm 0,5m_i) \leq 0,1$  в формулу (10.17) дает следующее выражение:

$$\frac{1}{1 + \left| \frac{m_i - x}{\alpha} \right|} = \frac{\alpha}{\alpha + 0,5m_i} \leq 0,1, \quad (10.19)$$

из которого следует, что  $\alpha_i = \beta_i = 0,0556m_i$ . Именно так и были получены величины размаха всех нечетких чисел, приведенные в правой части табл. 10.3.

Для априорной оценки меры возможности появления рассматриваемого здесь несчастного случая с помощью рис. 10.8 были составлены следующие структурные формулы:  $K = F \vee G \vee H$ ;  $L = C \vee D$ ;  $M = E \wedge K \wedge L$ ;  $X = A \vee B \vee M$  и соответствующие им упрощенные расчетные многочлены:  $P_K = P_A + P_M + P_B$ ;  $P_M = P_L \times P_K \times P_E$ ;  $P_L = P_C + P_D$ ;  $P_K = P_F + P_G + P_H$ . Затем, в соответствии с уравнениями (10.8) — (10.11) нетрудно получить выражения для рекурсивных множителей  $m_{r_i}$ ,  $\alpha_{r_i}$ ,  $\beta_{r_i}$ , необходимых для расчета модального значения меры возможности двух предпосылок ( $L, K$ ) второго и одной ( $M$ ) первого уровней ДП.

Например, вычисления по формулам (10.10), (10.11) параметров  $m_K$  и  $\alpha_K = \beta_K$  нечеткой возможности появления события  $K$  привели к следующим результатам:

<sup>1</sup> Еще один пример подобной аппроксимации таких, в действительности неизвестных, функций будет рассмотрен несколько ниже (см. параграф 12.4).



$$m_{\eta} = 1 - (1 - m_F)(1 - m_G) = 1 - (1 - 0,05)(1 - 0,05) = 0,097;$$

$$m_K = 1 - (1 - m_{\eta})(1 - m_H) = 1 - (1 - 0,097)(1 - 0,01) = 0,106;$$

$$\alpha_{\eta} = (1 - m_F)\alpha_G + (1 - m_G)\alpha_F = (1 - 0,05)0,003 + (1 - 0,05)0,003 = 0,0057;$$

$$\alpha_K = \beta_K = (1 - m_{\eta})\alpha_H + (1 - m_H)\alpha_{\eta} = (1 - 0,097) \cdot 0,001 + \\ + (1 - 0,01) \cdot 0,0057 = 0,0056,$$

т.е. мера возможности  $P_K$  появления в опасной зоне посторонних лиц равна нечеткому числу

$$P_K = (m_K, \alpha_K, \beta_K) = (0,106; 0,0056; 0,0056). \quad (10.20)$$

Подобным образом найдены нечеткие параметры меры возможности возникновения второго промежуточного события  $L$  (появления опасной зоны вокруг двух реакторов):

$$m_L = 1 - (1 - m_C)(1 - m_D) = 1 - (1 - 0,8)(1 - 0,8) = 0,960;$$

$$\alpha_L = \beta_L = (1 - m_C)\alpha_D + (1 - m_D)\alpha_C = \\ = (1 - 0,8) \cdot 0,045 + (1 - 0,8) \cdot 0,045 = 0,018;$$

$$P_L = (m_L, \alpha_L, \beta_L) = (0,960; 0,018; 0,018).$$

С помощью формул (10.8), (10.9) и табл. 10.3 получены подобные оценки также и для предпосылки  $M$ :

$$m_{\tau_1} = m_E m_K = 1,0 \cdot 0,106 = 0,106; \quad m_M = m_{\tau_1} m_L = 0,106 \cdot 0,96 = 0,102;$$

$$\alpha_{\tau_1} = m_E \alpha_K + m_K \alpha_E = 1,0 \cdot 0,004 + 0,106 \cdot 0,56 = 0,010;$$

$$\alpha_M = \beta_M = m_{\tau_1} \alpha_L + m_L \alpha_{\tau_1} = 0,106 \cdot 0,018 + 0,96 \cdot 0,01 = 0,012;$$

$$P_M = (m_M, \alpha_M, \beta_M) = (0,102; 0,012; 0,012).$$

Наконец, после подстановки в (10.10), (10.11) только что полученных данных о нечетких параметрах исходных предпосылок  $A$  и  $B$  найдена мера возможности возникновения рассматриваемого несчастного случая:

$$m_{\tau_2} = 1 - (1 - m_A)(1 - m_B) = 1 - (1 - 0,02)(1 - 0,02) = 0,039;$$

$$m_X = 1 - (1 - m_{\tau_2})(1 - m_M) = 1 - (1 - 0,039)(1 - 0,102) = 0,138;$$

$$\alpha_{\tau_2} = (1 - m_A)\alpha_B + (1 - m_B)\alpha_A = (1 - 0,02) \cdot 0,011 + \\ + (1 - 0,02) \cdot 0,011 = 0,022;$$

$$\alpha_X = \beta_X = (1 - m_{\tau_2})\alpha_M + (1 - m_M)\alpha_{\tau_2} = (1 - 0,039) \cdot 0,012 + \\ + (1 - 0,102) \cdot 0,022 = 0,032;$$

$$P_X = (m_X, \alpha_X, \beta_X) = (0,138; 0,032; 0,032).$$

Таким образом, данный иллюстративный пример подтверждает возможность нечеткого интервального прогнозирования техногенного риска, а только что полученный результат приближенного количественного анализа ДП следует понимать так: мера возможности отравления людей АХОВ оценивается диапазоном от 0,106 до 0,170 при наиболее возможном значении 0,138. Трудоемкость количественного анализа с нечетко заданными параметрами может быть снижена автоматизацией расчета по рекуррентным соотношениям (10.8) — (10.11).

### Пример 3

Данный пример касается уже экспресс-оценки среднего ущерба от аварии с помощью совмещенной диаграммы, включающей ДП совместно с ДС и изображенной на рис. 10.9 [16]. На нем же приведены исходные данные о вероятностях всех его предпосылок, а подлежащие прогнозу ущербы обозначены параметрами —  $Y_0, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ .

В качестве моделируемой здесь аварии подразумевается перегрев электродвигателя вентилятора из-за неисправности как системы его питания, так и предусмотренных на этот случай защитных устройств. Последствия перегрева зависят от обученности персонала действиям в подобной ситуации и надежности имеющихся средств пожаротушения. Величина ущерба определяется издержками от прекращения технологического процесса на ОПО, повреждения части его оборудования и травмирования людей.

Считается также, что вероятность  $P_0$  перегрева электродвигателя за 6 месяцев (период между ревизиями) равна 0,088, а вероятность  $P_1$  вызванного этим пожара — 0,02. Ущерб от одночасового прекращения рассматриваемого здесь процесса совпадает с затратами на ремонт перегретого электродвигателя и оценивается в 1000 руб. каждый, а в случае возникновения пожара и травмирования персонала увеличивается до 5 млн руб.

Пользуясь данными рис. 10.9, нетрудно рассчитать значения условных вероятностей  $Q_i$  пяти конечных исходов аварии и связанного с ними ущерба  $Y_i$ :

$$Q_0 = P_0(1 - P_1) = 0,086, \quad Y_0 = 1000 + 2 \cdot 1000 = 3000 \text{ (руб.)};$$

$$Q_1 = P_0 P_1 (1 - P_2) = 1,53 \cdot 10^{-3}, \quad Y_1 = 15\,000 + 24 \cdot 1000 = 39\,000 \text{ (руб.)};$$

$$Q_2 = P_0 P_1 P_2 (1 - P_3) = 2,24 \cdot 10^{-4}, \quad Y_2 = 1,74 \cdot 10^6 \text{ (руб.)};$$

$$Q_3 = P_0 P_1 P_2 P_3 (1 - P_4) = 9,41 \cdot 10^{-6}, \quad Y_3 = 2 \cdot 10^7 \text{ (руб.)};$$

$$Q_4 = P_0 P_1 P_2 P_3 P_4 = 6,54 \cdot 10^{-7}, \quad Y_{4\text{т}} = Y_3 + Y_4 = 5 \cdot 10^7 \text{ (руб.)}.$$

Ожидаемый за полгода средний ущерб получен с помощью формулы (10.12) при  $Q_{\text{гг}} = 1$  и оказался равным  $M_i(Y) = \sum Q_i Y_i = 930$  руб.

Таким образом, данный иллюстративный пример подтверждает возможность нечеткого интервального прогнозирования техногенного риска, а только что полученный результат приближенного количественного анализа ДП следует понимать так: мера возможности отравления людей АХОВ оценивается диапазоном от 0,106 до 0,170 при наиболее возможном значении 0,138. Трудоемкость количественного анализа с нечетко заданными параметрами может быть снижена автоматизацией расчета по рекуррентным соотношениям (10.8) — (10.11).

### Пример 3

Данный пример касается уже экспресс-оценки среднего ущерба от аварии с помощью совмещенной диаграммы, включающей ДП совместно с ДС и изображенной на рис. 10.9 [16]. На нем же приведены исходные данные о вероятностях всех его предпосылок, а подлежащие прогнозу ущербы обозначены параметрами —  $Y_0, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ .

В качестве моделируемой здесь аварии подразумевается перегрев электродвигателя вентилятора из-за неисправности как системы его питания, так и предусмотренных на этот случай защитных устройств. Последствия перегрева зависят от обученности персонала действиям в подобной ситуации и надежности имеющихся средств пожаротушения. Величина ущерба определяется издержками от прекращения технологического процесса на ОПО, повреждения части его оборудования и травмирования людей.

Считается также, что вероятность  $P_0$  перегрева электродвигателя за 6 месяцев (период между ревизиями) равна 0,088, а вероятность  $P_1$  вызванного этим пожара — 0,02. Ущерб от одночасового прекращения рассматриваемого здесь процесса совпадает с затратами на ремонт перегретого электродвигателя и оценивается в 1000 руб. каждый, а в случае возникновения пожара и травмирования персонала увеличивается до 5 млн руб.

Пользуясь данными рис. 10.9, нетрудно рассчитать значения условных вероятностей  $Q_i$  пяти конечных исходов аварии и связанного с ними ущерба  $Y_i$ :

$$Q_0 = P_0(1 - P_1) = 0,086, \quad Y_0 = 1000 + 2 \cdot 1000 = 3000 \text{ (руб.)};$$

$$Q_1 = P_0 P_1 (1 - P_2) = 1,53 \cdot 10^{-3}, \quad Y_1 = 15\,000 + 24 \cdot 1000 = 39\,000 \text{ (руб.)};$$

$$Q_2 = P_0 P_1 P_2 (1 - P_3) = 2,24 \cdot 10^{-4}, \quad Y_2 = 1,74 \cdot 10^6 \text{ (руб.)};$$

$$Q_3 = P_0 P_1 P_2 P_3 (1 - P_4) = 9,41 \cdot 10^{-6}, \quad Y_3 = 2 \cdot 10^7 \text{ (руб.)};$$

$$Q_4 = P_0 P_1 P_2 P_3 P_4 = 6,54 \cdot 10^{-7}, \quad Y_{4\Sigma} = Y_3 + Y_4 = 5 \cdot 10^7 \text{ (руб.)}.$$

Ожидаемый за полгода средний ущерб получен с помощью формулы (10.12) при  $Q_{\text{ит}} = 1$  и оказался равным  $M_i(Y) = \Sigma Q_i Y_i = 930$  руб.

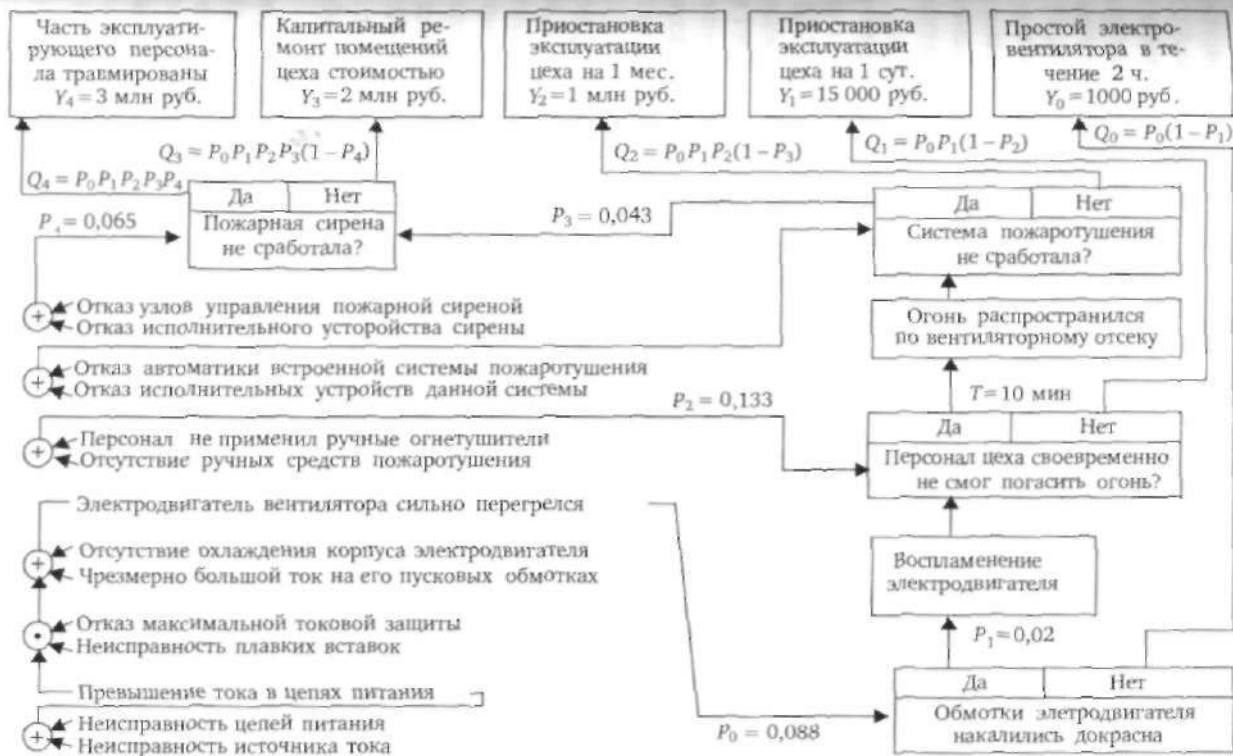


Рис. 10.9. Комбинированная диаграмма происшествия на ОПО

В завершение параграфа проиллюстрируем возможность использования рассмотренных выше диаграмм типа «дерево» для синтеза рекомендаций по снижению техногенного риска. Начнем с оценки эффекта от таких четырех организационно-технических мероприятий, предназначенных для исключения перелива перекачиваемого АХОВ (см. рис 10.5), как: 1) установка более надежного автоматического выключателя и 2) такого же хронометра; 3) проведение с оператором дополнительных теоретических и 4) практических занятий. Очевидно, что предложенные меры способны повлиять на предпосылки 12, 11 и 9, 8 (напомним, что первая имеет наивысшую значимость, а остальные — качественно одинаковую). Допустим, что их внедрение могло уменьшить соответствующие вероятности до следующих значений:  $P'_{12} = 0,0001$ ,  $P'_8 = 0,0005$ ,  $P'_9 = 0,0005$ ,  $P'_{11} = 0,00005$  и потребовало соответствующих затрат:  $S_{12} = S_{11} = 1500$  руб. и  $S_9 = S_8 = 500$  руб.

Поочередная подстановка уменьшенных вероятностей в приближенную формулу (10.16) приведет к новым значениям меры возможности головного события:  $Q'(X_{13}) \approx 0,00001$ ,  $Q'(X_8) = 0,000007$ ,  $Q'(X_9) = 0,0000007$  и  $Q'(X_{11}) = 0,0000003$ . Сравнение же между собой предложенных альтернатив по критерию «затраты — эффект» указывает на предпочтительность первого технического мероприятия. По крайней мере замена автоматического выключателя в десятки раз эффективнее последних организационных мероприятий, не говоря уже о смене хронометра.

Вторая иллюстрация касается уже прогноза снижения не вероятности, а ущерба от техногенной аварии, моделируемой на рис. 10.10. В частности, введение второго огнетушителя позволило снизить вероятность одновременного отказа этих средств пожаротушения до величины  $P'_2 = 0,133 \cdot 0,133 = 0,0171$ . Последующая подстановка этого значения в формулы для расчета  $Q_i$  и  $M(Y)$  приводит к следующим результатам:  $Q'_1 = 0,00173$ ,  $Q'_2 = 3 \cdot 10^{-5}$ ,  $Q'_3 = 3 \cdot 10^{-6}$ ,  $Q'_4 = 8 \cdot 10^{-9}$ ;  $M'(Y) = 258 + 67,5 + 52,2 + 24 + 0,4 = 402$  руб. В итоге эффект от данного мероприятия оценивается следующим снижением ущерба:  $\Delta M(Y) = 930 - 402 = 528$  руб.

Таким образом, можно утверждать, что рассмотренные здесь иллюстративные модели типа «дерево» подтвердили их пригодность для системного исследования техногенных происшествий. Причем сделано это путем как точного, так и приближенного прогноза параметров техногенного риска, а также с учетом вклада в них не только соответствующих факторов, но и мероприятий по его снижению.

## Вопросы и задания для самопроверки

1. Каким методом строят дерево происшествия, и что оно может отображать?
2. Что олицетворяют собой отдельные «ветви» и «листья» этой диаграммы?

3. Чем отличаются процесс построения дерева событий и дерева происшествия?
4. Укажите, в чем состоит цель качественного анализа диаграмм типа «дерево».
5. Какие вам известны методы качественного анализа дерева происшествия?
6. Что означают аббревиатуры МОС и МПС, и чем они принципиально отличаются?
7. С помощью каких параметров оценивается вклад исходных предпосылок в процесс появления и предупреждения происшествия?
8. Как составляется структурная функция дерева происшествия?
9. Какова цель количественного анализа диаграмм типа «дерево»?
10. Можно ли использовать результаты качественного анализа при прогнозировании и снижении техногенного риска?
11. Приведите формулы для расчета вероятности события, образованного конъюнкцией нескольких предпосылок.
12. Почему нельзя оценивать вероятность события, образованного дизъюнкцией предпосылок, путем суммирования этих же их параметров?
13. В каких случаях целесообразно использовать нечеткий подход к априорной оценке вероятности техногенных происшествий?
14. Каким образом могут быть представлены параметры предпосылок, используемых при нечетком интервальном прогнозе техногенного риска?
15. Что означает аппроксимация нечеткого числа функцией принадлежности  $L$ - $R$  типа?
16. Изложите идею обоснования наиболее эффективных мер безопасности с помощью моделей типа «дерево».
17. Каким образом при этом учитывается относительное влияние (положительный и отрицательный вклад) конкретных предпосылок и исходов?
18. В чем состоит принцип кодирования МОС и МПС десятичными числами?
19. Какие преимущества дает автоматизированный количественный анализ диаграмм типа «дерево» с помощью программного комплекса «АРБИТР»?
20. В чем заключается главная цель системного синтеза безопасности, основанная на результатах подобного моделирования техногенных происшествий?

**Ситуационная задача.** Рассчитайте средний социально-экономический ущерб, ожидаемый от разрушительного проявления происшествия, используя представленную на рис. 9.4, б модель, при условии что вероятность его возникновения  $Q_{\text{тс}} = 0,05$ , а конечные исходы учтенных сценариев характеризуются следующими условными вероятностями и ущербами:  $Q_k = 0,11$ ;  $Y_k = 10$  усл. ед.,  $k = 1, \dots, 9$ .

---

## **ГЛАВА 11      Моделирование и прогноз                          параметров риска                          происшествий с помощью                          диаграмм типа «граф»**

В данной главе рассматривается технология системного исследования техногенных происшествий на основе диаграмм, уже включающих обратные связи между учитываемыми факторами. Ее конструктивность подтверждается методикой и двумя конкретными примерами, демонстрирующими возможность прогноза показателей соответствующего риска. Начальные сведения о данной технологии даны в гл. 5 и 9, а ее применение демонстрируется ниже (гл. 17 и 18) — при априорной оценке уровня безопасности создаваемых ОПО.

### **11.1. Моделирование происшествий с помощью                          потокового графа**

Для выявления зависимости между выбранными ранее (см. параграф 6.8) показателями безопасности и параметрами человекомашинных систем, здесь также будет моделироваться процесс возникновения техногенных происшествий. Как и ранее, этот процесс станет интерпретироваться образованием причинной цепи предпосылок, необходимых для аварийного высвобождения накопленного там энергозапаса. Целью же предстоящего моделирования будет прогноз вероятности и ущерба происшествий, возможных в ходе перегрузки АХОВ (первая модель) и их транспортировки железнодорожным транспортом (вторая модель).

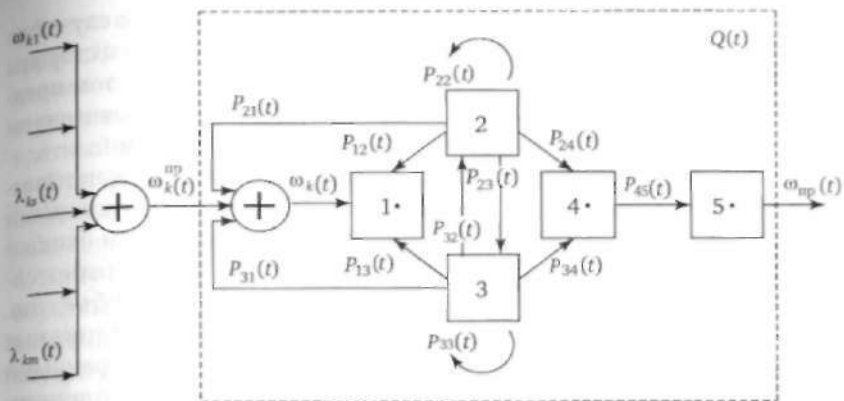


Рис. 11.1. Граф-модель возникновения происшествий на ОПО

Учитывая необходимость снижения трудоемкости разработки и системного анализа первой иллюстративной модели типа «поточный граф»<sup>1</sup>, при ее построении пришлось ограничиться учетом минимально необходимого числа наиболее существенных свойств и параметров соответствующей человекомашиной системы. Поэтому в качестве примера были выбраны погрузочно-разгрузочные работы с АХОВ, выполняемые бригадой из двух человек с помощью автокрана, а в число причин возможных происшествий были включены лишь ошибки людей, отказы используемого ими грузоподъемного механизма и параметры, характеризующие напряженность рассматриваемого технологического процесса.

Процесс образования причинной цепи предпосылок к возникновению техногенных происшествий в ходе перегрузки АХОВ представлен на рис. 11.1 в виде потокового графа. На вход соответствующей динамической системы поступает сигнал в виде проектного потока требований на выполнение конкретных технологических операций, задаваемый параметром  $\omega_k^{np}(t)$ . Его значения будут изменяться во времени  $t$ , так как зависят от двух переменных: числа  $m$  типов перегрузочных операций подобного вредного вещества и интенсивности  $\lambda_{ks}(t)$  их выполнения.

Возникновение происшествий в ходе рассматриваемого процесса интерпретируется появлением подобных случайных событий на выходе граф-модели и учитывается параметром  $\omega_{пр}(t)$  их потока. Считается также, что возникновению каждого из них предшествует

<sup>1</sup> Имеется в виду диаграмма причинно-следственных связей, включающая состояния, находясь в которых моделируемый ею объект взаимодействует с окружением, при этом одни из них являются истоками каких-либо событий, первоначальное появление которых может инициироваться внешними факторами, а другие — стоками событий, оказывающих влияние не только на сам этот объект, но и на его окружение.



появление особых ситуаций, обусловленных сочетаниями случайно возникших факторов и требующих нестандартной реакции со стороны персонала или эксплуатируемого им оборудования. При этом предполагается, что подобные ситуации могут быть вызваны появлением только ошибок людей и отказов используемой ими техники.

Среди таких предпосылок особое внимание уделяется так называемым *опасным событиям* в человекомашинной системе, под которыми подразумеваются отказы технологического оборудования и ошибки использующего его персонала, приводящие к появлению техногенных опасностей в зоне действия незащищенных от них объектов. Предупреждение подобных событий и локализация их нежелательных последствий обычно обеспечиваются специально предусмотренными для этого средствами и организационно-техническими мероприятиями. Однако вследствие их несовершенства незамеченные или своевременно не устраненные опасные события могут привести к появлению опасных и критических ситуаций, а иногда — и техногенных происшествий.

Кроме того, при построении графа использовались выявленные ранее (см. параграф 6.2) закономерности аварийности и травматизма, а также упрощающие *допущения*, позволившие сократить число состояний данной модели. В частности, непосредственно *не учитывались* нерасчетные внешние воздействия на людей и технологическое оборудование со стороны рабочей среды и не рассматривались условия выхода человекомашинной системы из опасных и критических ситуаций. Иначе говоря, предполагалось, что в случае успешного (в смысле отсутствия происшествий) завершения конкретной перегрузочной операции функционирование этой системы прекращалось в одном из поглощающих состояний графа — 1, 4 или 5.

Принятые допущения позволили учесть в изображенном выше графе лишь пять состояний, через которые может проходить человекомашинная система при функционировании с целью перегрузки АХОВ: 1 — динамическое равновесие, характеризуемое завершением операции без появления ошибок людей и отказов автокрана; 2 и 3 — особые ситуации, вызванные возникновением возможных ошибок и отказов соответственно; 4 — опасное состояние, обусловленное неустранением этих опасных событий; 5 — критическая ситуация, связанная с одновременным появлением в зоне действия возникшей опасности незащищенных от нее объектов.

При этом процесс выполнения рассматриваемых работ интерпретируется как обработка потока требований на выполнение перегрузки каких-либо АХОВ с поглощением подавляющего большинства таких требований в состояниях 1, 4 или 5. Поглощение означает, что человекомашинная система как бы адаптировалась соответственно к возникшей опасной и критической ситуациям путем их ликвидации, что

является основанием для начала обработки очередной заявки на перегрузку. Если же реализация каких-либо требований завершается появлением события на выходе графа, то это считается происшествием и учитывается вероятностью  $Q(t)$  его возникновения в данный дискретный момент перегрузки.

При формализации исследуемого здесь опасного технологического процесса также предполагалось следующее: а) исключались прямые переходы из состояния 1 в состояние 5, минуя 4, и в состояние 4, минуя состояния 2 или 3; б) учитывалась возможность не только обратных переходов из состояний 2 и 3 в состояние 1 (для повторения операций после выявления ошибок и отказов), но также переходов внутри и между состояниями 2 и 3. Принятие этих допущений позволило уменьшить число состояний графа до пяти, а переходов внутри него — до девяти.

## 11.2. Разработка аналитической модели, эквивалентной потоковому графу

Анализ природы заявок на выполнение рассматриваемых перегрузочных операций показал, что значительная их часть образует потоки случайных событий, обладающих свойствами ординарности и отсутствия последействия. Такое утверждение может быть дополнительно подтверждено относительно редким применением автомобильных кранов для перегрузки АХОВ, а также ныне достигнутой надежностью и эргономичностью этих грузоподъемных механизмов, влияющих на реальную вероятность возникновения ошибок эксплуатирующего их персонала и отказов ныне применяемых им грузозахватных средств.

Данное обстоятельство указало на возможность принятия допущения о представлении требований на выполнение рассматриваемых перегрузочных операций в виде простейшего потока случайных событий (см. параграф 3.4). По крайней мере такое (не принципиальное для последующих рассуждений) предположение справедливо в тех случаях, когда исследуемый здесь процесс будет состоять из большого числа разных перегрузочных операций сравнительно малой интенсивности, а некоторые из них будут иметь регулярный характер.

Принятое допущение использовано ниже при оценке вероятности появления техногенных происшествий при перегрузке АХОВ на основе инвариантности простейшего потока соответствующих требований после его разряжения путем исключения некоторых из них с вероятностью  $1 - Q(t)$ . Правомерность последнего строго доказана для экспоненциального распределения времени между происшествиями, а конструктивность такого подхода связана с возможностью получения

аналитического выражения для  $Q(t)$  с помощью тех вероятностей  $P_{ij}$  просеивания событий входного потока при их переходе из состояний  $i \in \{1; 2; 3; 4\}$  в состояния  $j \in \{1; 2; 3; 4; 5\}$  графа, которые включены в табл. 11.1.

**Таблица 11.1.** Вероятностные параметры, используемые в граф-модели

Наименование	Обозначение
Вероятность возникновения ошибок персонала при реализации им функций, предусмотренных технологией перегрузки	$P_{12}(t)$
Условная вероятность появления ошибок одного типа (у одних участников работ) при появлении ошибок другого типа (у других)	$P_{22}(t)$
Условная вероятность возникновения ошибок персонала при появлении отказов грузоподъемного оборудования	$P_{32}(t)$
Вероятность своевременного выявления и исправления ошибок персонала, участвующего в перегрузке АХОВ	$P_{21}(t)$
Вероятность появления отказов грузоподъемного оборудования при выполнении им заданных функций	$P_{13}(t)$
Условная вероятность появлений отказов одного типа (одних элементов оборудования) по причине отказа другого типа (других элементов)	$P_{33}(t)$
Условная вероятность возникновения отказов оборудования при появлении ошибок персонала	$P_{23}(t)$
Вероятность своевременного устранения персоналом ОПО отказов используемого им грузоподъемного оборудования	$P_{31}(t)$
Вероятность возникновения «опасных» ошибок персонала	$P_{24}(t)$
Вероятность появления «опасных» отказов оборудования	$P_{34}(t)$
Условная вероятность перерастания опасной ситуации в критическую	$P_{45}(t)$
Условная вероятность перерастания критической ситуации в происшествие	$P_{50}(t)$

*Примечание.* Все вероятности определяются для дискретного интервала времени работ  $t = t_2 - t_1$ .

При определении выбранным здесь способом вероятности  $Q(t)$ , необходимой для прогноза риска появления происшествий при перегрузке АХОВ, в последующем не будет учитываться вероятность многократного появления одних особых ситуаций по причине других. Это означает, что ошибка или отказ какого-либо компонента человеко-машинной системы в последующем может вызвать с соответствующей вероятностью не более одного возможного отказа или ошибки. Принятие данного допущения как бы исключает «зацикливание» потоков внутри графа, ограничивая длину цепи предпосылок к опасной ситуации двумя подобными особыми событиями.

Что касается приемлемости данного допущения, то оно может быть обосновано тщательным контролем работ по перегрузке АХОВ, а также блокировкой или автоматическим отключением используемого грузоподъемного оборудования при появлении опасных отказов или ошибок. Вследствие этого вероятности последовательного возникновения на небольшом дискретном интервале времени трех и более предпосылок будут величинами значительно меньшими по сравнению с вероятностями исходных ошибок и отказов.

Руководствуясь данными представлениями о необходимых и достаточных условиях появления происшествий, можно записать выражения для параметров тех потоков, которые:

а) образованы такими ошибками персонала и отказами техники, которые обусловлены их несовершенством и учтены переходами между событиями 1, 2 и 1, 3 граф-модели:

$$\omega_{12}(t) = \omega_k(t)P_{12}(t); \quad \omega_{13}(t) = \omega_k(t)P_{13}(t); \quad (11.1)$$

б) состоят из таких отказов техники и ошибок персонала, которые были индуцированы появлением предшествующих им событий подобного типа:

$$\omega_{23}(t) = (\omega_{12}(t) + \omega_{22}(t))P_{23}(t); \quad \omega_{32}(t) = (\omega_{13}(t) + \omega_{33}(t))P_{32}(t), \quad (11.2)$$

где  $\omega_{12}(t)$ ,  $\omega_{13}(t)$  и  $\omega_{23}(t)$ ,  $\omega_{32}(t)$  — параметры потоков отказов и ошибок, соответственно, возникших первоначально и впоследствии;  $\omega_k(t)$  — параметр потока реальных требований на проведение перегрузочной операции, учитывающих необходимость ее повторения после выявления и устранения препятствующих этому ошибок и отказов;  $\omega_{22}(t)$ ,  $\omega_{33}(t)$  — параметры потоков отказов и ошибок одного типа (одних участников работ), возникших из-за появления ошибок и отказов другого типа (других элементов техники).

Значения двух последних составляющих параметров суммарного потока подобных особых ситуаций могут быть найдены по следующим зависимостям:

$$\omega_{22}(t) = \omega_{12}(t)P_{22}(t); \quad \omega_{33}(t) = \omega_{13}(t)P_{33}(t). \quad (11.3)$$

После подстановки выражений (11.1) в формулы (11.2) с учетом зависимостей (11.3) и вынесения общего множителя за скобки получим:

$$\begin{aligned} \omega_{23}(t) &= \omega_k(t)P_{12}(t)P_{23}(t)(1 + P_{22}(t)); \\ \omega_{32}(t) &= \omega_k(t)P_{13}(t)P_{32}(t)(1 + P_{33}(t)). \end{aligned} \quad (11.4)$$

По аналогии с выражением (11.2) запишем выражения для интенсивностей устранения ошибок персонала —  $\mu_{21}(t)$  и отказов тех-

нологического оборудования —  $\mu_{31}(t)$ , являющихся также слагаемыми суммарного параметра потока требований на повторное (см. рис. 11.1 — второй слева символ  $\oplus$ ) выполнение рассматриваемых здесь технологических операций:

$$\begin{aligned}\mu_{21}(t) &= (\omega_{12}(t) + \omega_{32}(t) + \omega_{22}(t))P_{21}(t); \\ \mu_{31}(t) &= (\omega_{13}(t) + \omega_{23}(t) + \omega_{33}(t))P_{31}(t).\end{aligned}\quad (11.5)$$

Подстановка выражений (11.1)—(11.4) в зависимости (11.5) и несложные преобразования дают следующие формулы для определения искомых составляющих суммарного потока дополнительных требований на выполнение работ:

$$\begin{aligned}\mu_{21}(t) &= \omega_k(t)P_{21}(t)[P_{12}(t)(1 + P_{22}(t)) + P_{13}(t)P_{32}(t)(1 + P_{23}(t))]; \\ \mu_{31}(t) &= \omega_k(t)P_{31}(t)[P_{13}(t)(1 + P_{33}(t)) + P_{12}(t)P_{23}(t)(1 + P_{32}(t))].\end{aligned}\quad (11.6)$$

Для отыскания параметров потоков своевременно неисправленных ошибок персонала ОПО  $\omega_{24}(t)$  и неустранимых им отказов используемого грузоподъемного оборудования  $\omega_{34}(t)$ , образующих при наложении поток опасных событий в человекомашиновой системе, прием дополнительные допущения. Будем считать, что процесс развития цепи предпосылок происходит практически мгновенно, что позволяет рассматривать граф-модель как безынерционную динамическую систему, исключаящую потерю событий в состояниях 2 и 3. Правомерность допущения обоснована малостью времени перегрузки конкретного АХОВ и быстротечностью нахождения человекомашиновой системы в этих двух состояниях потокового графа в сравнении с ее жизненным циклом.

С учетом данного обстоятельства можно утверждать о равенстве в каждый дискретный момент времени потоков событий, входящих в состояния 2 и 3 рассматриваемого графа и выходящих из них. Отсюда вытекает справедливость следующих выражений для этих двух слагаемых потока опасных событий:

$$\begin{aligned}\omega_{24}(t) &= \omega_{12}(t) + \omega_{22}(t) + \omega_{32}(t) - \omega_{23}(t) - \mu_{21}(t); \\ \omega_{34}(t) &= \omega_{13}(t) + \omega_{33}(t) + \omega_{23}(t) - \omega_{32}(t) - \mu_{31}(t).\end{aligned}\quad (11.7)$$

После подстановки в правые части выражений (11.7) значений их слагаемых из формул (11.3)—(11.6) и проведения алгебраических преобразований получим следующую формулу для расчета параметра результирующего потока опасных ситуаций:

$$\omega_{oc}(t) = \omega_{24}(t) + \omega_{34}(t) = \omega_k(t) [P_{12}(t)(1 + P_{22}(t) - P_{21}(t) - P_{22}(t)P_{21}(t) - P_{23}(t)P_{31}(t) - P_{22}(t)P_{23}(t)P_{31}(t)) + P_{13}(t)(1 + P_{33}(t) - P_{31}(t) - P_{33}(t)P_{31}(t) - P_{32}(t)P_{21}(t) - P_{33}(t)P_{32}(t)P_{21}(t))]. \quad (11.8)$$

Для исключения из выражения (11.8) неизвестных параметров представим параметр потока фактических требований на выполнение  $k$ -х технологических операций в виде суммы:

$$\omega_k(t) = \omega_k^p(t) + \mu_{21}(t) + \mu_{31}(t). \quad (11.9)$$

Подстановка в уравнение (11.8) значения параметра  $\omega_k(t)$ , найденного по формуле (11.9) с учетом соотношений (11.7), а также последующее проведение некоторых преобразований дают следующее выражение для параметра потока происшествий при перегрузке какого-либо АХОВ:

$$\omega_p^{(k)}(t) = Q_k(t)\omega_k^p(t), \quad (11.10)$$

где  $Q_k(t)$  — вероятность появления техногенных происшествий при проведении данной ( $k$ -й) технологической операции, определяемая по следующей формуле:

$$Q_k(t) = \frac{A(t)}{B(t)} P_{45}(t) P_{50}(t), \quad (11.11)$$

где

$$\begin{aligned} A(t) &= P_{12}(t)[1 + P_{22}(t) - P_{21}(t) - P_{22}(t)P_{21}(t) - P_{23}(t)P_{31}(t) - \\ &- P_{22}(t)P_{23}(t)P_{31}(t)] + P_{13}(t)[1 + P_{33}(t) - P_{31}(t) - P_{33}(t)P_{31}(t) - \\ &- P_{32}(t)P_{21}(t) - P_{33}(t)P_{32}(t)P_{21}(t)]; \\ B(t) &= 1 - P_{12}(t)[P_{21}(t) + P_{22}(t)P_{21}(t) + P_{23}(t)P_{31}(t) + \\ &+ P_{22}(t)P_{23}(t)P_{31}(t)] - P_{13}(t)[P_{31}(t) + P_{33}(t)P_{31}(t) + \\ &+ P_{32}(t)P_{21}(t) + P_{33}(t)P_{32}(t)P_{21}(t)]. \end{aligned}$$

Поясним, что первый множитель (дробь) правой части формулы (11.11) представляет собой формулу для расчета вероятности появления опасных ситуаций, рассчитываемую как сумма вероятностей возникновения своевременно не выявленных и (или) не устраненных ошибок персонала и таких же отказов грузоподъемного оборудования. Два последних множителя формулы (11.11) являются условными вероятностями перерастания опасных ситуаций в критические и критических — в происшествия (см. табл. 11.1).

Согласно принятым допущениям сумма вероятностей  $P_{12}(t)$  и  $P_{13}(t)$ , стоящих в виде множителей перед квадратными скобками чис-

лителя и знаменателя этой дроби, никогда не превышает единицы;  $P_{13}(t) + P_{12}(t) < 1$ , так как состояние 1 всегда «поглощает» подавляющую часть требований входного потока. Это же справедливо и для вторых сомножителей рассматриваемой дроби (выражений в квадратных скобках), что обусловлено их структурой и размерностью входящих параметров. Поэтому для всех операций данного процесса, как правило, характеризуемых значениями вероятностей  $P_{13}(t)$  и  $P_{12}(t) \ll 1$ , а  $P_{21}(t)$  и  $P_{31}(t) \rightarrow 1$ , величина этой дроби обычно не превышает нескольких сотых долей от единицы.

*Правдоподобность* только что полученного выражения<sup>1</sup> указывает на возможность определения вероятности возникновения происшествий при выполнении любых технологических процессов, если известны показатели безотказности и безошибочности соответствующих человекомашинных систем. Так, при конкретном количестве типов операций  $m$ , составляющих какой-либо процесс, а также известной проектной интенсивности их выполнения  $\omega_k^{np}(t)$  и найденного с помощью формулы (11.11) значения  $Q_k(t)$  вероятность безопасного проведения подобных технологических эксплуатационных процессов в течение времени  $t$  может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$P_g(\tau) = \exp\left(-\tau \sum_{k=1}^m \omega_k^{np}(t) Q_k(t)\right), \quad (11.12)$$

тогда как риск (вероятность) возникновения аварийности и травматизма в рассматриваемых условиях будет определяться дополнением  $P_g(\tau)$  до единицы:

$$Q_g(\tau) = 1 - \exp\left(-\tau \sum_{k=1}^m \omega_k^{np}(t) Q_k(t)\right). \quad (11.13)$$

Таким образом, моделирование с помощью потокового графа условий появления происшествий (при проведении взятой для примера перегрузки АХОВ грузоподъемным краном) подтверждает возможность получения аналитических выражений, пригодных для последующего прогноза одного из выбранных ранее показателей производственно-экологической безопасности. Однако до того как предложить соответствующую методику, вначале необходимо более тщательно проверить результаты моделирования на достоверность и обосновать принципиальную возможность получения входящих в них параметров.

<sup>1</sup> Особенно наглядно условие, что числитель дроби из формулы (11.11) всегда меньше знаменателя, будет видно в более простом выражении (11.22), являющемся частным случаем зависимости (11.11), где это требование соблюдается для всех  $P_{12}(t) + P_{13}(t) < 1$ .

### 11.3. Обоснование и системный анализ результатов графо-аналитического моделирования

Продемонстрируем адекватность разработанной выше модели появления техногенных происшествий и возможность ее практического использования на примере следующих трех задач:

- а) обоснование принципиальной возможности определения параметров аналитических выражений (11.11) — (11.13);
- б) проверка адекватности как их, так и граф-модели;
- в) оценка достоверности основанных на этом рекомендаций.

При их решении будем исходить из принятых выше предположений и информации, которая может оказаться доступной в ходе создания технологического оборудования ОТУ и разработки процессов его эксплуатации.

Решение *первой* задачи начнем с указания способа априорной оценки условной вероятности  $P_{45}(t)$  возникновения критических ситуаций, вызванных появлением в соответствующей человекомашиной системе своевременно неустраненных опасных событий. При этом напомним, что состояние 5 граф-модели предполагает совмещение незащищенных элементов этой системы с зоной действия проявившегося источника техногенного риска. Следовательно, для прогноза значений  $P_{45}(t)$  необходимы данные о параметрах, характеризующих конкретные источники опасности реализуемой технологической операции.

Однако в большинстве случаев верхняя оценка величины этой условной вероятности равна

$$P_{45}(t) = \tau_k^{(4)}(t) / \tau_k(t), \quad (11.14)$$

где  $\tau_k^{(4)}(t)$ ,  $\tau_k(t)$  — время нахождения незащищенных объектов в зоне возможного появления опасных факторов (в состоянии 4 графа) и длительность  $k$ -й технологической операции, проводимой в дискретный момент  $t \in [0; T_j]$  времени функционирования рассматриваемой системы, которая имеет назначенный ресурс эксплуатации  $T_j$ .

Что касается условной вероятности  $P_{50}(t) = P_{np}(t)$  перерастания критической ситуации в происшествие, то для ее прогноза необходимо исходить из непоглощения соответствующего опасного события состоянием 5 потокового графа. Подобное условие может быть представлено произведением (а иногда и суммой) таких случайных событий, как отказ технических средств защиты, предусмотренных для парирования опасных ситуаций в ОТУ, и (или) ошибка его персонала при ликвидации либо локализации их нежелательных последствий.

Считая в первом приближении эти условия необходимыми и достаточными для появления происшествия в человекомашиной системе,



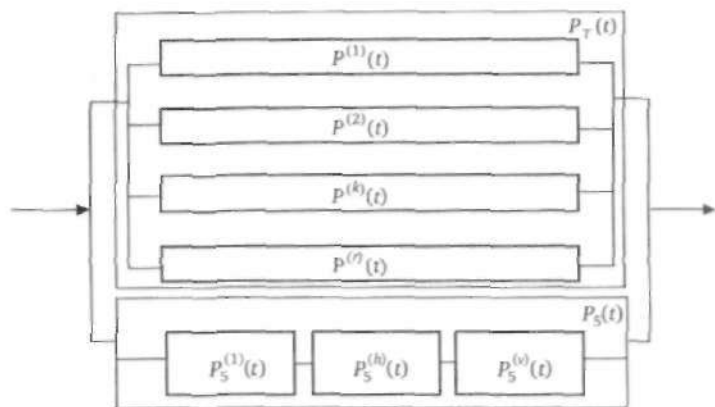


Рис. 11.2. Структурная схема безопасности

можно составить соответствующую структурную схему безопасности ее функционирования в такой ситуации. Подобная схема приведена на рис. 11.2, где параметр  $r$  означает число технических средств защиты, задействованных при выполнении конкретной технологической операции (верхний блок схемы), а  $v$  — количество занятого в ней персонала (нижний блок).

В этих условиях перерастание критической ситуации в техногенное происшествие (переход события через состояние 5 графа) эквивалентно пропуску сигнала хотя бы одним из блоков данной структурной схемы безопасности. Следовательно, справедливо соотношение

$$P_{\text{пр}}(t) = 1 - P_T(t)P_5(t), \quad (11.15)$$

где  $P_T(t)$  — вероятность безотказной работы технических средств защиты в дискретный момент времени  $t$  проведения технологической операции, найденная при условии, что к его началу они были исправны;  $P_5(t)$  — вероятность безошибочного выполнения персоналом алгоритмов, предусмотренных на случай появления критической ситуации (состояние 5).

Значение входящей в формулу (11.15) вероятности  $P_T(t)$  может быть определено стандартными методами оценки надежности в технике — с помощью вероятностей  $P_T^{(k)}(t)$  безотказной работы отдельных ( $k$ -х) технологических средств и используемых при этом приборов безопасности, а также их общего количества  $r$  и способа соединения. Например, для показанного на рис. 11.2 их параллельного соединения величина этой вероятности соответствует

$$P_T(t) = 1 - \prod_{k=1}^r (1 - P_T^{(k)}(t)), \quad (11.16)$$

тогда как при последовательном соединении технических средств обеспечения безопасности достаточно ограничиться перемножением всех  $P_T^{(k)}(t)$ .

В случае более сложных структурных схем безопасности при определении вероятности  $P_T(t)$  также необходимо руководствоваться положениями теории надежности. При этом следует учитывать лишь те отказы технических средств защиты, которые сопровождаются воздействием случайно возникших опасных факторов на незащищенные от них элементы человекомашиной системы и ОТУ в целом. Иначе говоря, значение вероятности  $P_T^{(k)}(t)$  по отношению к иным отказам их средств защиты здесь принимается равным единице.

Для предварительной оценки второго сомножителя формулы (11.15) — вероятности  $P_5(t)$  — необходимы данные о численности  $v$  персонала и вероятностях  $P_5^{(h)}(t)$  безошибочной и своевременной ликвидации им возникших критических ситуаций. Если параметр  $v$  и перечень подобных нестандартных ситуаций должны определяться с учетом эксплуатационно-технологической документации и опыта функционирования аналогичных человекомашинных систем, то вероятности  $P_5(t)$  в первом приближении могут быть найдены по формуле

$$P_5(t) = \prod_{h=1}^v P_5^{(h)}(t) / K_{3y}, \quad (11.17)$$

где  $K_{3y}$  — эмпирический коэффициент [9], учитывающий экстремальность или дискомфортность условий труда человека-оператора (см. табл. А.3 в приложении к данному учебнику).

Входящая в эту формулу вероятность  $P_5^{(h)}(t)$  безошибочных и своевременных действий человека, а также имеющиеся в модели (11.11) вероятности  $P_{31}(t)$ ,  $P_{21}(t)$  и  $P_{12}(t)$  (соответственно — ликвидации отказов, ошибок и непоявления последних) могут быть определены с помощью обобщенного структурного метода теории эргатических систем [4]. Необходимыми для этого исходными данными служат:

а) предусмотренные документацией алгоритмы  $A_f^{(i)}$  действий персонала в стандартных ( $i = 1$ ) и нестандартных ( $i = 2, \dots, 5$ ) ситуациях — состояниях графа на рис. 11.1;

б) справочные данные о продолжительности и вероятности безошибочного выполнения среднестатистическим человеком-оператором элементарных действий — тактов алгоритма  $A_f^{(i)}$ ;

в) перечень и параметры подобных тактов (см. табл. А.2 в приложении).

В частности, оценка вероятности  $P_{11}^{(h)}$  безошибочного и своевременного устранения человеком отказов и ошибок ( $i = 2, 3$ ) за заданное время основана на аппроксимации ее значения гамма-распределенной случайной величиной с параметрами формы и масштаба

$$c_i = M^2(\tau_A) / \sigma_{\tau_A}^2; \quad d_i = M(\tau_A) / \sigma_{\tau_A}, \quad (11.18)$$

где  $M(\tau_A)$  — математическое ожидание времени, необходимого человеку для выполнения конкретного алгоритма  $A_f^{(i)}$ ;  $\sigma_{\tau_A}^2$  — дисперсия оценки этого параметра.

При известных левых частях выражений (11.18) искомые вероятности успешной ликвидации возникших отказов и ошибок соответственно равны

$$P_{21}(t) = P_{21}(A_f^{(2)}, \tau_A^{(2)}) = 1 - \Phi(2d_2\tau_A^{(2)}, c_2); \quad (11.19)$$

$$P_{31}(t) = P_{31}(A_f^{(3)}, \tau_A^{(3)}) = 1 - \Phi(2d_3\tau_A^{(3)}, c_3), \quad (11.20)$$

где  $\tau_A^{(i)}$  — предельно допустимое время от появления ошибки ( $i = 2$ ) или отказа ( $i = 3$ ) до возникновения опасности;  $\Phi(2d_i, \tau_A^{(i)}, c_i)$  — случайная гамма-распределенная величина.

При определении входящих в выражения (11.18) параметров длительности  $M(\tau_A)$ ,  $\sigma_{\tau_A}^2$  и безошибочности действий персонала ОТУ ( $1 - P_{12}(t)$ ) исходят из того, что каждый их алгоритм  $A_f^{(i)}$  может быть декомпозирован на совокупность упомянутых выше тактов и образуемых ими типовых функциональных структур. При этом последние затем сводятся к нескольким простейшим конструкциям с заранее выведенными расчетными формулами [4], позволяющими оценивать искомые здесь вероятностные и временные параметры.

Вероятность безотказной работы технологического оборудования за время выполнения  $k$ -х технологических операций ( $1 - P_{13}(t)$ ) может быть оценена стандартными методами теории надежности. Для неизменной интенсивности  $\lambda(t)$  отказов на сравнительно небольших интервалах времени  $\tau_k(t)$  функционирования техники справедлива следующая формула:

$$P_{13}(t) = 1 - \exp(-\lambda\tau_k(t)). \quad (11.21)$$

Наконец, условные вероятности появления ошибок людей из-за отказов используемой ими техники  $P_{32}(t)$ , отказов вследствие ошибок  $P_{23}(t)$ , а также ошибок одного человека из-за ошибок другого  $P_{22}(t)$  и отказов одних элементов вследствие отказов других  $P_{33}(t)$  могут быть найдены рассмотренными выше методами, но при условии их некоторой модификации. Например, включением элементов технологического оборудования и членов работающего на нем персонала в структурные схемы безотказности первого и алгоритмы функционирования второго, а затем исследованием полученных диаграмм методом статистических испытаний или имитационным моделированием происшествий (см. параграф 12.3).

Учитывая трудоемкость определения подобным способом условных вероятностей  $P_{23}(t)$ ,  $P_{32}(t)$ ,  $P_{22}(t)$  и  $P_{33}(t)$ , а также иллюстративный характер рассматриваемого здесь примера, проведем некоторое упрощение формулы (11.11), а затем выдадим рекомендации по облегчению оценки оставшихся в ней параметров. Например, правомерно это сделать для простейших операций, выполняемых на отдельно взятой технологической установке или на нескольких агрегатах ОПО последовательно, т.е. при условии, что выполнение каждой очередной подобной работы начинается лишь после завершения предыдущей.

Оказывается, что в этом случае предложенную выше графоаналитическую модель можно значительно упростить путем исключения внутри графа потоков с параметрами  $\omega_{23}(t)$ ,  $\omega_{32}(t)$ ,  $\omega_{22}(t)$  и  $\omega_{33}(t)$ , т.е. приданием в формуле (11.11) соответствующим вероятностям нулевых значений. В этом случае имеем:

$$Q_k(t) = P_{45}(t)P_{np}(t) \frac{P_{12}(t) + P_{13}(t) - P_{12}(t)P_{21}(t) - P_{13}(t)P_{31}(t)}{1 - P_{12}(t)P_{21}(t) - P_{13}(t)P_{31}(t)}. \quad (11.22)$$

Заметим также, что показатели безошибочности и своевременности выполнения персоналом простейших алгоритмов  $A^{(i)}$  могут быть рассчитаны в данном случае не по формулам (11.18) — (11.20), а простым перемножением соответствующих параметров элементарных действий, входящих в каждый из подобных алгоритмов, и сложением длительности времени, необходимого для осуществления всех подобных тактов.

При найденном по формуле (11.22) или (11.11) значении  $Q_k(t)$  параметр потока техногенных происшествий определяется следующим образом:

$$\bar{\omega}_1(t) = \sum_{k=0}^m \omega_k^{np}(t) Q_k(t), \quad (11.23)$$

тогда как вероятность их возникновения на интервале  $\tau = t_2 - t_1$  будет уже равна:

$$Q(\tau) = 1 - \exp(-\bar{\omega}_{np}\tau), \quad (11.24)$$

где  $\bar{\omega}_{np}$  — средняя на отрезке времени  $t$  величина параметра потока происшествий, оцениваемая с помощью (11.23) и (11.22) или по (11.11) при усредненных вероятностях  $P_{ij}(t)$ .

Что касается других задач, заявленных в начале данного параграфа, — проверки достоверности разработанных выше моделей и обоснования вытекающих из них рекомендаций, то при их решении изучим вначале реакцию левых частей выражений (11.11) и (11.22) — (11.24) на изменение входящих в них параметров, а затем проанализируем полученные таким образом результаты. При этом оказывается,

что замена в (11.11) и (11.22) вероятностей  $P_{ij}(t)$  и  $P_{np}(t)$  на их граничные (равные нулю и единице) значения делает равной им и величину  $Q_k(t)$ . Подобное имеет место с вероятностью  $Q(\tau)$  в формуле (11.24) при нулевых и бесконечно больших значениях времени  $t$  и параметра  $\varpi_{np}$  потока происшествий.

Повышение же трудоемкости технологического процесса (рост параметров  $\omega_k^{np}(t)$  и  $m$ ), увеличение вероятностей  $P_{12}(t)$ ,  $P_{13}(t)$  появления отказов и ошибок, а также снижение числа и эффективности технических средств обеспечения безопасности, проявившиеся в росте вероятностей  $P_{np}(t)$  и  $P_{45}(t)$ , будут повышать риск аварийности и травматизма, т.е. увеличивать значения левых частей формул (11.11) и (11.22). В то же время абсолютная безотказность техники и безошибочность персонала —  $P_{13}(t) = P_{12}(t) = 0$  — или устранение им всех предпосылок к возможным происшествиям —  $P_{31}(t) = P_{21}(t) = 1$  — полностью исключают проявление соответствующих источников, обеспечивая равенство  $Q_k(t) = 0$ .

Возвращаясь к другим рекомендациям, следует отметить, что они вытекают из качественного анализа приведенного на рис. 11.1 графа. Например, с их помощью можно уточнить содержание таких важных понятий, как «безопасность производственных процессов» и «безопасность оборудования». Так, менее опасным следует считать процесс, имеющий при прочих равных условиях: а) простую структуру (малое число  $m$ ); б) низкие интенсивность  $\omega_k^{np}(t)$  и длительность  $\tau$  выполнения отдельных операций; в) совершенные средства обеспечения безопасности — малые  $P_{45}(t)$  и  $P_{np}(t)$ . Безопасным же будет считаться производственное оборудование, обладающее простой и одновременно эргономичной конструкцией, что проявляется соответственно в малых значениях вероятностей  $P_{13}(t)$ ,  $P_{23}(t)$ ,  $P_{33}(t)$  и  $P_{12}(t)$ ,  $P_{32}(t)$ ,  $P_{22}(t)$  и  $P_5(t)$ .

Однако последние условия являются взаимно исключаящими: простая (безотказная) по конструкции техника, как правило, неэргономична, так как требует сложных алгоритмов, а потому и не защищена от возможных ошибок персонала в обычных и нестандартных ситуациях. Данный факт подтверждает объективно существующие диалектические противоречия, которые порождают появление происшествий на производстве и транспорте и которые должны учитываться в последующем системном анализе и синтезе безопасности в техносфере.

Наконец, сделанная только что проверка правильности результатов моделирования позволяет использовать их для априорной количественной оценки параметров риска техногенных происшествий. Сформулируем основные положения соответствующей методики в предположении, что эксплуатация большинства современных производственных объектов может быть декомпозирована на отдельные операции, рассматриваемые как функционирование соответствующих человекомашинных систем.

## 11.4. Методика априорной оценки риска происшествий на объекте повышенной опасности

Предлагаемая ниже методика может быть применена начиная с момента определения структуры, конструктивного исполнения и технологии эксплуатации конкретного ОПО. Оцениваемыми по ней показателями являются:

1) вероятность  $Q(\tau)$  возникновения техногенных происшествий в течение времени  $\tau$  его функционирования;

2) ожидаемый от них за этот же период ущерб  $M_{\tau}(Y)$ ;

3) связанные с этим средние задержки времени  $M_{\tau}(Z)$ .

Исходными данными, необходимыми для априорной оценки таких показателей, служат:

а) параметры производственного процесса (количество типов  $m$  технологических операций и предполагаемая интенсивность  $\omega_k^{np}(t)$  проведения каждой из них, общая длительность времени  $\tau$  их выполнения и количество  $v_k$  привлекаемого персонала);

б) параметры *безопасности* и *своевременности* действий персонала в обычных и особых ситуациях: заданные ему алгоритмы  $A_j^{(i)}$  и продолжительности времени:  $\tau_i(t)$  — их выполнения,  $\tau_k^{(4)}(t)$  — нахождения незащищенных компонентов соответствующей человеко-машинной системы в зоне возможного появления опасных факторов и  $\tau_A^{(i)}(t)$  — предельно допустимого с момента возникновения ошибки персонала ( $i = 2$ ) и отказа техники ( $i = 3$ ) до появления этих факторов;

в) параметры надежности производственного оборудования: структурные схемы безотказности в различных режимах функционирования и интенсивности  $\lambda(t)$  отказов его элементов, а также наименования, надежность и количество  $r$  технических средств защиты персонала, используемых в конкретных технологических операциях для обеспечения безопасности выполнения им своих функций;

г) справочные данные о надежности среднестатистического человека-оператора, аварийности и травматизме на аналогичном технологическом оборудовании и другой технике универсального назначения: средние длительности  $M(\tau_j)$  выполнения элементарных тактов алгоритма  $A_j^{(i)}$  и их стандартные отклонения  $\sigma_{\tau_j}$ ; вероятности  $\beta_j$  безошибочного выполнения этих тактов и вероятности  $k_j$  ошибок контроля их правильности; коэффициенты  $K_{\text{эу}}$  экстремальности либо дискомфортности условий труда персонала в различных ситуациях; число  $N$  типов особых ситуаций и происшествий, средние задержки  $z_j$  времени и средний ущерб  $y_j$  от одного происшествия  $j$ -го типа.

Априорная количественная оценка выбранных показателей техногенного риска осуществляется разработчиком ОПО совместно с при-

влекаемыми для этого специализированными организациями и включает следующие этапы.

1. Сбор данных, необходимых для определения указанных выше параметров, и проведение дополнительных целевых исследований. Требуемые для расчетов исходные данные определяются изучением проектно-технологической и эксплуатационной документации на оборудование ОТУ, включая расчеты прочности и устойчивости их элементов. При сборе этих данных могут быть использованы приведенные в приложениях А и Б к настоящей книге справочные данные, позаимствованные из научно-технической литературы по надежности техники и качеству человекомашинных систем.

2. Прогноз вероятностей  $P_{13}(t)$ ,  $P_{23}(t)$  и  $P_{33}(t)$ , характеризующих безотказность технологического оборудования ОТУ при выполнении  $k$ -х технологических операций, проводится с помощью структурных схем безотказности и с учетом приведенных выше рекомендаций.

3. Оценка вероятностей  $P_{12}(t)$ ,  $P_{21}(t)$ ,  $P_{32}(t)$ ,  $P_{22}(t)$ ,  $P_{31}(t)$  и  $P_5(t)$ , определяющих своевременность и безошибочность выполнения персоналом заданных функций в процессе функционирования соответствующих ОТУ, осуществляется в следующей последовательности.

3.1. Алгоритмы  $A_j^{(i)}$  функционирования персонала представляются в виде совокупностей элементарных действий и типовых функциональных структур с учетом рекомендаций [4] и эксплуатационно-технологической документации ОПО по выполнению конкретных операций.

3.2. Подбираются параметры быстродействия  $M(\tau_r)$ ,  $\sigma_{\tau}$  и безошибочности  $\beta_r$ ,  $k_r$  выполнения тактов алгоритмов  $A_j^{(i)}$ , предписанных персоналу ОТУ в обычных условиях (состояние 1 граф-модели), а также на случай устранения нестандартных ситуаций, т.е. возникших ошибок, отказов (состояния 2, 3), опасных и критических ситуаций (состояния 4, 5) — по табл. А.1 и А.2 приложения.

3.3. Рассчитываются показатели безошибочности  $P_{12}^{(h)}(t)$ ,  $P_{22}^{(h)}(t)$ ,  $P_{32}^{(h)}(t)$  и  $P_{58}^{(h)}(t)$  выполнения каждого подобного алгоритма  $P_{12}^{(h)}(t)$  — в соответствии с изложенными выше рекомендациями.

3.4. При найденных значениях параметров быстродействия  $M(\tau_r)$ ,  $\sigma_{\tau}$  и  $\tau_d^{(i)}(t)$  определяются вероятности  $P_{21}^{(h)}(t)$ ,  $P_{31}^{(h)}(t)$ ,  $P_{5c}^{(h)}(t)$  своевременного выполнения алгоритмов каждым членом персонала ОТУ — по формулам (11.18) — (11.21).

3.5. Рассчитываются вероятности  $P_5^{(h)}(t)$  безошибочных и своевременных действий персонала по ликвидации создавшихся на ОТУ критических ситуаций — перемножением вероятностей  $P_{58}^{(h)}(t)$  и  $P_{5c}^{(h)}(t)$ .

3.6. Определяются вероятности безошибочных  $(1 - P_{12}(t)$ ,  $1 - P_{22}(t)$ ,  $1 - P_{32}(t))$  и своевременных  $(P_{21}(t)$ ,  $P_{31}(t))$  действий по выполнению персоналом алгоритмов  $A_j^{(i)}$ , возложенных на него в  $i$ -х технологиче-

ских операциях, — перемножением вероятностей  $P_{ij}^{(h)}(t)$ , найденных ранее для каждого его члена.

4. С помощью формул (11.15) — (11.17) находят условные вероятности — перерастания опасных ситуаций в критические ( $P_{45}(t)$ ) и критических в происшествия ( $P_{np}(t)$ ).

5. Оценивают вероятности  $Q_k(t)$  возникновения происшествий при выполнении конкретных технологических операций на ОТУ по зависимости (11.22) или (11.11) с учетом особенностей их эксплуатации и имеющихся исходных данных.

6. Определяют вероятность  $Q(\tau)$  появления аварийности и травматизма при проведении на рассматриваемых ОТУ и ОПО в целом всего производственного процесса в течение заданного времени — по формулам (11.24) и (11.23).

7. Рассчитывают ожидаемые средние потери (задержки) времени работы ОТУ и такую же величину ущерба из-за возможных на нем техногенных происшествий:

$$M_{\tau}(Z) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j Q_j(\tau); \quad M_{\tau}(Y) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j Q_j(\tau). \quad (11.25)$$

### Пример 1

Апробация методики проведена на примере прогнозирования риска перегрузки АХОВ с помощью автомобильного крана типа КС-3572. Так как при данных работах оператор автокрана и такелажник действуют последовательно, то вероятность происшествий за время одной перегрузки удалось оценить с помощью упрощенной формулы (11.22).

1. Изучением проектно-технологической и эксплуатационной документации указанного выше автокрана установлено, что  $\lambda(t) = 0,045 \text{ ч}^{-1}$ ,  $m = 1$ ,  $v_k = 2$ ,  $\tau_k(t) = 20 \text{ мин}$ ,  $r = 2$ ,  $\tau_A^{(2)}(t) = 54 \text{ с}$ ,  $\tau_A^{(3)}(t) = 54 \text{ с}$ ,  $\tau^{(4)}(t) = 3 \text{ мин}$  и  $\omega_k^{\text{пр}}(t) = 360 \text{ л/год}$ .

2. Вероятность  $P_{13}(t)$  отказа автокрана за время одной перегрузки была рассчитана по формуле (11.21) на основе проектной интенсивности отказов и соответствующей структурной схемы надежности; при этом ее величина оказалась равной 0,015.

3. Используя заданные технологией перегрузки АХОВ алгоритмы  $A_j^{(i)}$  действий рабочих в стандартных и нестандартных ситуациях, а также приведенные выше рекомендации, оценены вероятности:  $P_{12}(t) = 0,16$ ;  $P_{21}(t) = 0,849$ ;  $P_{31}(t) = 0,874$ ;  $P_{\tau}(t) = 0,978$ ,  $P_5(t) = 0,828$ .

4. С помощью формул (11.15) — (11.17) и принятых исходных данных были рассчитаны условные вероятности перерастания опасной ситуации в критическую и критической — в происшествие:  $P_{45}(t) = 0,15$ ;  $P_{np}(t) = 0,174$ .

5. Вероятность  $Q_k(t)$  появления происшествий за одну перегрузочную операцию рассчитана по формуле (11.22) и оказалась равной 0,0008.



6. При выбранной интенсивности и однотипности работ по перегрузке АХОВ рассчитана вероятность происшествий на ОПО за год их выполнения, значение которой оказалось следующим:  $Q(\tau) = 0,251$ .

7. Ожидаемый от аварийности и травматизма средний ущерб за этот срок был оценен по правой формуле из (11.25) и с помощью статистических данных о тяжести ( $Y = 660$ ) последствий одного происшествия при перегрузке АХОВ:  $M_{\tau}(Y) = 0,251 \cdot 660 = 165$  у.е.

В предположении экспоненциального распределения времени найденная оценка  $Q(\tau) = 0,251$  эквивалентна параметру «средняя наработка на происшествие», равному 410 ч перегрузки АХОВ автокраном с двумя рабочими. При выбранной интенсивности данных работ это соответствует примерно 3,5 годам их проведения с указанной ранее интенсивностью, равной 360 перегрузкам в год. Или иначе — из каждых 10 тыс. рассматриваемых здесь работ в 8 из них могут возникать техногенные происшествия различного типа (катастрофа, несчастный случай с людьми, авария).

Заметим, однако, что предложенная модель не позволяет прогнозировать риск появления *конкретного* происшествия, хотя относительное распределение их различных типов может быть найдено с помощью статистических данных. В частности, если исходить из обычно рекомендуемого соотношения между числом несчастных случаев, аварий и поломок, выражаемого пропорцией 1 : 10 : 30, то среди каждых 250 происшествий при перегрузке АХОВ в среднем будут иметь место 6 несчастных случаев, 61 авария и втрое больше поломок.

Что касается *достоверности* подобного прогноза, то по арифметическому порядку этот результат совпадает, например, с оценками  $Q(\tau)$  других авторов [37], однако более строго о его точности можно судить, зная дисперсию оценок, получаемых по формулам (11.22)—(11.24). С целью упрощения расчета представим ее в виде линеаризованных функций случайных переменных, а входящие в них параметры заменим оценками средних значений соответствующих нормально распределенных величин. При этих допущениях значение дисперсии оценки  $Q_k(t)$  может быть определено, например, по следующей формуле:

$$D(Q) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial Q}{\partial P_{ij}} \right)^2 \Big|_{M_Q} D(P_{ij}) + 2 \sum_{i < j} \frac{\partial Q}{\partial P_{ij}} \Big|_{M_Q} \frac{\partial Q}{\partial P_{ij}} \Big|_{M_Q} K_{ij}, \quad (11.26)$$

где  $\frac{\partial Q}{\partial P_{ij}} \Big|_{M_Q}$  — частные производные функции (11.22) по всем ее вероятностям  $P_{ij}(t)$ , рассчитываемые для оценки  $M_Q$  математического ожидания этой функции;  $D(P_{ij})$  — дисперсии соответствующих оценок  $P_{ij}(t)$ ;  $K_{ij}$  — корреляционная матрица величин  $P_{ij}(t)$ .

В предположении о некоррелированности шести параметров ( $m = 6$ ) модели (11.22) можно получить следующие выражения для входящих в формулу (11.26) частных производных:

$$\partial Q / \partial P_{12} = \frac{P_{45} P_{np} (1 + P_{13} P_{21} + 2P_{13} P_{21} P_{31} - P_{21} - P_{13} P_{31})}{(1 - P_{12} P_{21} - P_{13} P_{31})^2}; \quad (11.27)$$

$$\partial Q / \partial P_{13} = \frac{P_{45} P_{np} (1 + P_{12} P_{31} + 2P_{12} P_{21} P_{31} - P_{31} - P_{12} P_{21})}{(1 - P_{12} P_{21} - P_{13} P_{31})^2}; \quad (11.28)$$

$$\partial Q / \partial P_{21} = \frac{P_{12} P_{45} P_{np} (P_{12} + P_{13} - 1)}{(1 - P_{12} P_{21} - P_{13} P_{31})^2}; \quad (11.29)$$

$$\partial Q / \partial P_{31} = \frac{P_{13} P_{45} P_{np} (P_{12} + P_{13} - 1)}{(1 - P_{12} P_{21} - P_{13} P_{31})^2}; \quad (11.30)$$

$$\partial Q / \partial P_{45} = P_{np} \frac{P_{12} + P_{13} - P_{12} P_{13} - P_{13} P_{21}}{(1 - P_{12} P_{21} - P_{13} P_{31})^2}; \quad (11.31)$$

$$\partial Q / \partial P_{np} = P_{45} \frac{P_{12} + P_{13} - P_{12} P_{13} - P_{13} P_{21}}{(1 - P_{12} P_{21} - P_{13} P_{31})^2}. \quad (11.32)$$

Что касается способов оценки дисперсий  $D(P_{ij})$  и корреляционных коэффициентов  $K_{ij}$ , входящих в выражение (11.26), то их значения могут быть найдены подобным образом. Однако, исходя из иллюстративного характера рассматриваемого примера, соответствующие выкладки здесь не приводятся. С учетом этого, а также подразумевая под параметрами  $P_{np}(t)$ ,  $P_{ij}(t)$  выражений (11.27)–(11.32) математические ожидания этих вероятностей с числовыми значениями, взятыми из примера 1, может быть получено следующее приближенное выражение для первого слагаемого формулы (11.26):

$$D(Q_k) = 0,057D(P_{12}(t)) + 0,00017D(P_{13}(t)) + 0,00002D(P_{21}(t)) + 0,00002D(P_{31}(t)) + 0,0000002D(P_{np}(t)) + 0,00003D(P_{45}(t)), \quad (11.33)$$

где  $D(P_{ij}(t))$ ,  $D(P_{np}(t))$  — дисперсии оценок параметров, входящих в зависимость (11.22), которые в последующих расчетах рассматривались как известные исходные данные.

Не приводя результата расчетов по последней формуле, отметим, что найденная по ней дисперсия  $D(Q_k)$  оказалась примерно в двадцать раз меньше по сравнению с суммой дисперсий входящих в нее вероятностей, что косвенно свидетельствует о приемлемой точности прогноза риска происшествий даже по упрощенной модели (11.22).

Заметим также, что формулы (11.22)—(11.33) потребуются ниже (см. параграф 18.2) при использовании результатов этой модельной оценки для повышения достоверности статистического контроля одного из параметров техногенного риска в условиях дефицита эмпирических данных и невозможности отложить принятие решений о степени удовлетворения заданным к риску требованиям.

## 11.5. Граф-модель возникновения происшествия на транспорте

Второй (заявленный в начале этой главы) иллюстративный пример прогнозирования техногенного риска с помощью графа будет связан с перевозками АХОВ по железной дороге, что обусловлено актуальностью и дефицитом подобных теоретических исследований. Кроме того, при моделировании возможного при этом происшествия будем учитывать уже не только ошибки людей и отказы техники, но и нерасчетные для них воздействия рабочей среды, поскольку последняя группа предпосылок, например, приводит к 70—90% зарегистрированных железнодорожных крушений и аварий.

Другими соображениями в пользу прогноза риска перевозки АХОВ стали тяжелые последствия железнодорожных происшествий, а также ограниченные возможности их предупреждения — единственная степень свободы (стоп-кран локомотива) и колоссальная инертность поезда. Все эти факторы учтены в изображенном на рис. 11.3 графе состояний и переходов, отражающем возможность появления железнодорожного крушения при функционировании человекомашиной системы «машинист — поезд — железнодорожный путь».

Анализ структуры графа и учитываемых им факторов (табл. 11.2) выявил отсутствие в нем замкнутых циклов, а также невозможность синхронного наступления событий 4 и 5, т.е. одновременного получения ими сигнала от своих входящих дуг — 2-4, 3-4 и 3-5, 4-5. Данное обстоятельство свидетельствует о возможности оценки вероятности

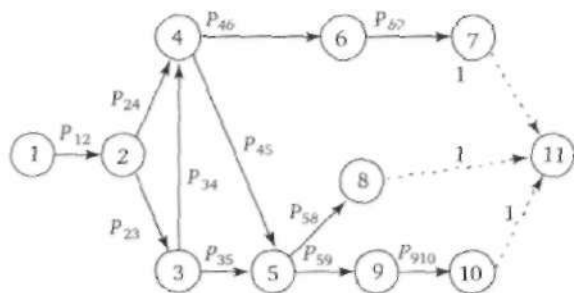


Рис. 11.3. Модель возникновения железнодорожного крушения

железнодорожного крушения, например, в течение одного года (прохождения сигнала от истока 1 к стоку 11) довольно простым способом. Например, считая все соответствующие цепочки независимыми, логично представить каждую причинную цепь подобного транспортного происшествия в виде конъюнкции необходимых для этого событий, а сам факт его возникновения — дизъюнкцией всех возможных причинных цепей его предпосылок.

Таблица 11.2. Основные факторы и параметры железнодорожного крушения

Дуги	Наименование учебного фактора	Вероятность $P_{ij}$
1—2	Поезд с АХОВ вышел на железнодорожный перегон с неисправной колеей	1,0
2—3	Указатель занятости железнодорожного перегона не работает	0,1
2—4	Указатель занятости работоспособен	0,9
3—5	Индикатор исправности колеей железнодорожного перегона не работает	0,1
3—4	Индикатор исправности колеей сигнализирует диспетчеру о неисправности пути	0,9
4—5	Диспетчер не замечает сигнала о появлении повреждения железнодорожного пути	0,0001
4—6	Диспетчер принимает сигнал повреждения и информирует машиниста об опасности	0,9999
6—7	Тормоза движущегося поезда не срабатывают	$1 \cdot 10^{-6}$
7—11	Движущийся поезд на полной скорости въезжает на поврежденную железнодорожную колею	1,0
5—8	Машинист не замечает поврежденного участка железнодорожной колеей	0,1
8—11	Движущийся поезд на полной скорости въезжает на поврежденную железнодорожную колею	1,0
5—9	Машинист обнаруживает повреждение пути	0,9
9—10	Поезд преодолевает расстояние, минимально необходимое для экстренной остановки	1,0
10—11	Движущийся поезд с АХОВ въезжает на поврежденную железнодорожную колею	1,0

Нетрудно убедиться, что в данном случае можно выявить восемь различных вариантов прохождения сигнала от истока 1 к узлам 7, 8 и 9, что эквивалентно (см. правую колонку табл. 11.2: их  $P_{ij} = 1$ ) достижению стока 11. На этом основании правомерно представить перечисленные выше условия, например, следующим уравнением алгебры событий:

$$\begin{aligned}
 & (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 5 \wedge 9) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 5 \wedge 8) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 9) \vee \\
 & \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 8) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 9) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 8) \vee \\
 & \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 6 \wedge 7) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 6 \wedge 7) \Rightarrow 11. \quad (11.34)
 \end{aligned}$$

Для прогноза вероятности появления железнодорожного происшествия с АХОВ необходимо упростить последнее выражение по правилам булевой алгебры, а затем преобразовать его в соответствующий вероятностный многочлен и провести необходимые вычисления. Учитывая иллюстративный характер рассматриваемого примера, сделаем это двумя способами — приближенно вручную и точно, с помощью программного комплекса «АРБИТР».

В первом случае ограничимся определением завышенного значения искомой вероятности [50] путем последовательного суммирования произведений вероятностей всех тех событий, которые помещены в каждую из круглых скобок выражения (11.34):

$$Q = \sum_{i=1}^a \prod_{j=1}^{d_i} P_{ij} \leq 1, \quad (11.35)$$

где  $a = 8$  — количество путей прохождения сигнала от истока графа до его общего стока;  $d_i \in \{4, 4, 5, 5, 4, 4, 5, 4\}$  — число дуг, соединяющих исток графа в  $i$ -м пути с одним из его событий 7, 8 и 9;  $P_{ij}$  — вероятности реализации  $j$ -х дуг графа в  $i$ -м пути.

Подстановка в формулу (11.35) всех вероятностей  $P_{ij}$  дает приближенное выражение для верхней (завышенной) оценки этого же параметра правого события граф-модели:

$$\begin{aligned} Q = & P_{12}P_{23}P_{35}P_{59}P_{9,10} + P_{12}P_{23}P_{35}P_{58} + P_{12}P_{23}P_{34}P_{45}P_{59}P_{9,10} + \\ & + P_{12}P_{23}P_{34}P_{45}P_{58} + P_{12}P_{24}P_{45}P_{59}P_{9,10} + P_{12}P_{24}P_{45}P_{58} + \\ & + P_{12}P_{23}P_{34}P_{46}P_{67} + P_{12}P_{24}P_{46}P_{67}. \end{aligned} \quad (11.36)$$

Замена же в этой формуле всех вероятностей на их количественные значения, взятые из табл. 11.2, позволяет рассчитать приближенное значение вероятности железнодорожного крушения при перевозке АХОВ, которая в данном случае оказалась равной  $Q = 0,001$ .

Что касается второго способа, то результаты уточненного количественного прогноза касались уже не только вероятности рассматриваемого здесь транспортного происшествия и связанного с ним ущерба, но также изменения этих показателей техногенного риска под воздействием альтернативных мероприятий по его снижению. Фрагмент отчета с исходными данными и результатами соответствующей оценки приведен в виде табл. 11.3.

Поясним, что подобно параграфу 10.5 исходными данными для прогноза упомянутых выше показателей риска транспортировки АХОВ железнодорожным транспортом служат взятые для примера параметры: а) величина среднего ущерба  $Y$  от исследуемого здесь происшествия с проливом 40 т перевозимого жидкого хлора (подробнее об этом будет сказано несколько ниже — при описании рис. 14.2); б) вероятно-

Таблица 11.3. Фрагмент отчета с исходными данными и результатами прогноза

Задача № 2. Оценка эффективности мероприятия по снижению риска транспортировки АХОВ (априорно с помощью модели типа «граф»)

Исходные данные:

Тип рассматриваемых работ — перевозка АХОВ

Предполагаемый средний ущерб  $Y$  — 180 000

Количество альтернативных оргтехмероприятий — 6

N	$P_{12}$	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{34}$	$P_{35}$	$P_{45}$	$P_{46}$	$P_{59}$	$P_{58}$	$P_{9,10}$	$P_{67}$	M
0	1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,0001	0,9999	0,9	0,1	1,0000	0,00000001	1
1	2	0,2	0,8	0,8	0,2	0,0003	0,9997	0,9	0,2	0,9995	0,00000003	1
2	3	0,1	0,9	0,7	0,3	0,0005	0,9995	0,9	0,4	0,9990	0,00000002	1
3	5	0,1	0,9	0,9	0,1	0,0007	0,9993	0,9	0,4	0,9980	0,00000007	1
4	7	0,2	0,8	0,8	0,2	0,0009	0,9991	0,9	0,5	0,9900	0,00000012	1
5	9	0,2	0,8	0,9	0,1	0,0007	0,9993	0,9	0,6	0,9800	0,00000016	1
6	4	0,2	0,8	0,7	0,3	0,0005	0,9995	0,9	0,7	0,9995	0,00000006	1

Результаты решения:

Альтернатива	Вероятность	Затраты	Эффект	Относительный эффект
0	0,0009			
1	0,0007	123	36	0,292
2	0,0006	180	54	0,300
3	0,0005	1430	72	0,050
4	0,0004	800	90	0,112
5	0,0003	6540	108	0,016
6	0,0002	9080	126	0,013

сти  $P_j(t)$  реализации всех соответствующих предпосылок (дуг графа);  
 в) исходное и альтернативные значения этих вероятностей вместе с затратами, необходимыми для мероприятий по понижению последствий. При этом рассматривались 6 мероприятий, а соответствующие им исходные данные и результаты расчета помещены в табл. 11.3.

Как и раньше, относительный эффект всех альтернативных мероприятий по снижению вероятности моделируемого железнодорожного крушения в данном случае рассчитывался делением того снижения ущерба от него  $\Delta Y_k$ , которое ожидалось от их внедрения, на необходимые для этого затраты  $S_k$ . Сами же значения  $\Delta Y_k$  определялись умножением эффекта  $\Delta Q_k$ , найденного вычитанием из каждой исходной вероятности  $Q_k$  ее новой (уменьшенной) величины, на значение ожидаемого среднего ущерба  $Y$  от одного подобного происшествия.

Как это ясно из табл. 11.3, из рассмотренных шести альтернатив максимальный относительный эффект обеспечили вторая и первая.

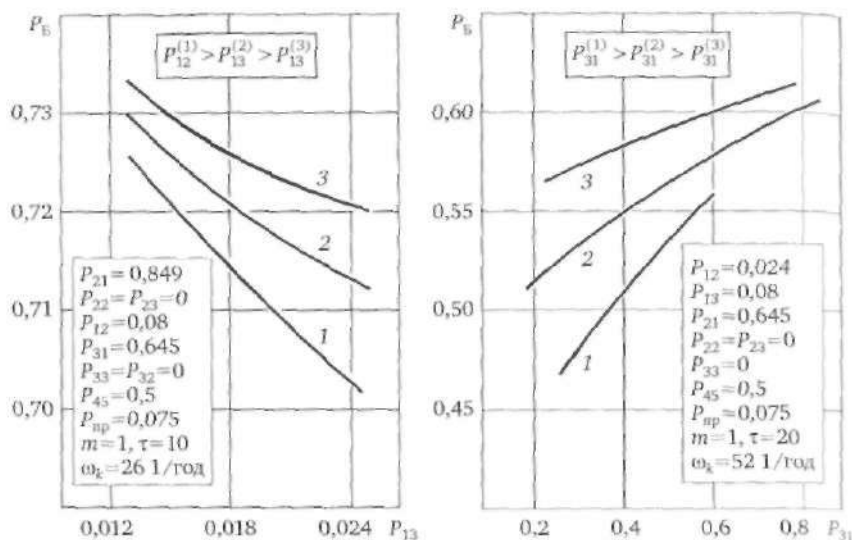


Рис. 11.4. Графики зависимостей  $P_B(P_{13}|P_{ij}, P_{np}, \tau)$  и  $P_B(P_{31}|P_{ij}, P_{np}, \tau)$

Обратим внимание, что результаты точной оценки вероятности исследуемого происшествия (вторая колонка нижней таблицы) заметно отличаются от ее приближенного значения (0,001), причем в меньшую сторону.

А вот на рис. 11.4 уже представлены итоги автоматизированного количественного анализа рассмотренного выше (см. рис. 11.1) потокового графа, полученные с помощью формул (11.22)—(11.24). При этом вместо оцененной вероятности  $Q(\tau)$  появления происшествий при перегрузке АХОВ автокраном на нем фигурирует ее дополнение до единицы:  $P_B = 1 - Q(\tau)$ .

В целом же изложенные в данной главе результаты свидетельствуют о целесообразности применения причинно-следственных диаграмм типа «граф» для системного исследования техногенных происшествий с целью прогноза соответствующего риска. Ведь, как можно было убедиться, подобные модели пригодны не только для выявления закономерностей их возникновения и устранения, но и для оценки эффективности организационно-технических мероприятий, предлагаемых для повышения безопасности в техносфере.

## Вопросы и задания для самопроверки

1. Что представляют собой стрелки, входящие и выходящие из изображенного на рис. 11.1 потокового графа?

2. Укажите различия между учтенными событиями на рис. 11.1 с кодами 2, 3 и 1, 4, 5.
3. Какие главные допущения приняты при построении граф-модели рис. 11.1?
4. В чем состоит идея получения на основе графа эквивалентной аналитической модели?
5. Поясните физический смысл параметров формул (11.10) — (11.11)?
6. Что означает понятие «структурная схема безопасности» и где оно используется?
7. На что указывает коэффициент экстремальности условий и зачем он нужен?
8. Какие важные выводы могут быть сделаны с помощью качественного анализа моделей, основанных на рассмотренном в главе потоковом графе?
9. Как осуществляется проверка правильности полученной на основе качественного анализа аналитической модели?
10. Перечислите задачи, решаемые в ходе количественного анализа подобных моделей.
11. Укажите исходные данные и показатели используемых в методике априорной оценки показателей безопасности производственных процессов.
12. Какие из исходных данных методики априорной оценки показателей безопасности производственных процессов наиболее трудоемки для определения?
13. В чем состоит проверка достоверности и точности результатов аналитического моделирования по предложенной в главе методике?
14. Какой метод используется для оценки разброса результатов аналитического моделирования?
15. В чем заключается существенное отличие графов, изображенных на рис. 11.1 и 11.3?
16. Поясните идею, положенную в основу количественного анализа модели, изображенной на рис. 11.3.
17. Что может быть сделано для облегчения количественного прогноза безопасности с помощью рассмотренных в главе граф-моделей?
18. Укажите способы, примененные для упрощения количественного анализа параметрической формулы (11.11).
19. Что дает автоматизация количественного анализа моделей типа «граф»?
20. Как можно использовать на практике результаты анализа моделей типа «граф»?

**Ситуационная задача.** Рассчитайте вероятность достижения конечного состояния графа, изображенного на рис. 3.2 из приложения 3 к данной книге, используя те сведения о вероятностях смены его состояний, которые имеются в описании этой модели, и считая, что ее начальное событие произошло.



---

## **ГЛАВА 12**    **Моделирование и прогноз параметров риска происшествий с помощью диаграмм типа «сеть»**

Рассматриваемый в главе тип графических моделей является наиболее совершенным, так как позволяет прогнозировать не только вероятность наступления каких-либо техногенных происшествий, но и параметры требуемого для этого времени, а также учитывать практически все существенные для них факторы. Первая возможность демонстрируется на примере аналитической модели, полученной с помощью сравнительной простой сети, а вторая — с помощью имитационного моделирования происшествий при функционировании человекомашинной системы.

### **12.1. Принципы построения и системного анализа сетей стохастической структуры**

При изложении основных принципов построения и анализа диаграмм причинно-следственных связей рассматриваемого типа логично руководствоваться теми начальными сведениями о них, которые были изложены ранее (см. параграф 9.3). Поэтому в данной главе продемонстрируем только возможности их использования (преимущественно — сетей стохастической структуры типа GERT) при аналитическом и имитационном моделировании процесса возникновения происшествий при функционировании человекомашинных систем.

Цель же такого моделирования будет состоять в прогнозе меры возможности и времени до появления техногенных происшествий.

Однако, учитывая сравнительно малую известность сетей GERT, вначале определимся с составом и содержанием используемых в них параметров. Ими обычно служат: а) вероятности  $P_{ij}$  реализации соответствующих дуг сети, б) затраты времени  $t_{ij}$ , средств или других ресурсов аддитивной природы при переходе из ее узла  $i$  в узел  $j$ ; в) плотности вероятности  $f_{ij}$  распределения соответствующих издержек и г) условные производящие функции моментов  $M_{ij}(S)$  этого же распределения. При этом под производящими функциями моментов подразумеваются аналитические зависимости, последовательное взятие производных от которых дает выражения для различных числовых характеристик соответствующей случайной величины. В частности, для дискретной случайной величины  $t_{ij}$  справедливо следующее математическое выражение этой функции:

$$M_{ij}(S) = \sum_{k=0}^{\infty} t_{ij}^k P_{ij} = \sum_{t_{ij}=0}^{\infty} e^{St_{ij}} f(t_{ij}), \quad (12.1)$$

где  $S = 0, 1, 2, \dots, k$  — порядковый номер центрального момента случайной величины этого типа.

Из определения производящей функции следует, что центральные моменты  $\mu_{kE}$  соответствующего распределения могут быть найдены ее  $k$ -кратным дифференцированием по  $S$  и присвоением в соответствующей производной этому параметру нулевого значения:

$$\mu_{kE} = \left. \frac{\partial^k M_{ij}(S)}{\partial S^k} \right|_{S=0}. \quad (12.2)$$

Выражения для часто применяемых производящих функций моментов распределения случайных величин приведены в табл. В.6 в приложении.

Количественный анализ сетей GERT удобно осуществлять, объединяя два их параметра  $M_{ij}(S)$  и  $P_{ij}$  в одно образование  $W_{ij}(S)$ :

$$W_{ij}(S) = P_{ij} M_{ij}(S), \quad (12.3)$$

обладающее идентичными свойствами и уже характеризующее пропускную способность (проводимость) отдельной дуги или сети в целом.

Для определения вероятности  $Q(T)$  наступления конкретного события сети и числовых характеристик требуемого для этого времени (математического ожидания его величины  $M(T)$  и дисперсии  $D(T)$  его

оценки) проводят упрощение исходной сети GERT. Реализуется оно путем объединения последовательных, параллельных и замкнутых контуров данной причинно-следственной диаграммы в единственную ветвь с эквивалентной им проводимостью  $W_{ij}^*(S)$ :

а) для последовательно соединенных узлов  $i, j$  и  $k$  их совместная проводимость

$$W_{ik}^*(S) = W_{ij}(S)W_{jk}(S); \quad (12.4)$$

б) для параллельных ветвей 1-2 и 3-4, условно объединенных в один общий исток под номером  $i = (1 \wedge 3)$  и один общий сток  $k = (2 \wedge 4)$ , их эквивалентная проводимость

$$W_{ik}^*(S) = W_{12}(S) + W_{34}(S); \quad (12.5)$$

в) для сочетания одной петли  $i-k$  с включающей ее (собственной) дугой  $i-i$

$$W_{ik}^*(S) = \frac{W_{ik}(S)}{1 - W_{ii}(S)}; \quad (12.6)$$

г) для петли  $m$ -го порядка, содержащей  $m$  непосредственно не связанных между собой циклов первого порядка, величина эквивалентного коэффициента пропускания равна

$$W_m^*(S) = \prod_{k=1}^m W_k(S). \quad (12.7)$$

Однако все эти правила справедливы лишь для замкнутых стохастических сетей, т.е. для таких, у которых существует обратная связь между каким-либо стоком и главным истоком. Это означает, что использование подобных правил требует предварительного искусственного замыкания разомкнутой сети GERT путем введения дополнительной дуги, коэффициент пропускания  $W_A(S)$  которой должен быть подобран специальным образом. Процедура подобной модификации исходной сети и определения значения ее проводимости  $W_E(S)$  основана на использовании топологического уравнения С. Мэсона (*S. Mason*), которое имеет следующий вид [22, 24]:

$$1 - \sum W^*(L_1) + \sum W^*(L_2) - \sum W^*(L_3) + \dots + (-1)^m \sum W^*(L_m) = 0, \quad (12.8)$$

где  $\sum W^*(L_i)$  — сумма коэффициентов проводимости всех петель  $i$ -го порядка, которые имеются в модифицированной (искусственно замкнутой) сети GERT.

Общая же последовательность определения пропускной способности  $W_E(S)$  разомкнутой стохастической сети по формуле (12.8) включает следующие основные этапы:

1. Замыкание любого ее стока (исхода моделируемого процесса) с главным истоком (его начальным событием) дугой с коэффициентом проводимости  $W_A(S)$ .

2. Упрощение полученной таким образом стохастической сети путем последовательного свертывания ее ветвей и расчет их  $W_{ik}^*(S)$  по формулам (12.4), (12.5).

3. Выявление в замкнутой сети GERT всех петель и вычисление их эквивалентных проводимостей  $W^*(L_i)$  по формулам (12.6), (12.7).

4. Подстановка значений  $W^*(L_i) = f(W^*(L_i), W_A(S), W_E(S))$  в топологическое уравнение (12.8) с учетом знаков всех слагаемых и разрешение его относительно искомой проводимости  $W_E(S)$ .

Продемонстрируем работоспособность данной процедуры на примере прогнозирования не только вероятности  $Q(T)$  появления интересующего нас события, как это делалось до сих пор, но и таких числовых характеристик необходимого для этого времени, как математическое ожидание  $M(T)$  и дисперсия  $D(T)$  этой случайной оценки. Естественно, что значения всех искомых параметров будут зависеть от структуры сети и пропускной способности каждого из ее элементов, которая характеризуется  $M_{ij}(S)$  и  $P_{ij}$  или эквивалентной им функцией  $W_{ij}(S)$ .

Внутри прямоугольника, имеющегося на приведенном ниже рисунке 12.1, изображена уже известная по гл. 9 (см. рис. 9.5, а), но несколько видоизмененная сеть GERT. Данная ее модификация осуществлена в соответствии с рекомендациями первого пункта реализуемой здесь иллюстративной процедуры, о чем свидетельствует наличие в этой сети искусственно введенной обратной связи, а также присвоение соответствующих пропускных способностей не только ей —  $W_A(S)$ , но также всем другим дугам —  $W_{ij}(S)$  и оригинальной сети в целом —  $W_E(S)$ .

Определение неизвестного коэффициента  $W_A(S)$  осуществлено по правилу «а» (свертывания двух последовательно соединенных ветвей), давшее выражение  $W^*(S) = W_E(S)W_A(S)$ , и его подстановки в формулу (12.8):

$$1 - \sum W^*(S) = 1 - W_E(S)W_A(S) = 0. \quad (12.9)$$

Решение этого уравнения позволило получить следующее значение для пропускной способности искусственно введенной обратной связи:

$$W_A(S) = 1 / W_E(S). \quad (12.10)$$

Изучение структуры сети, представленной на рис. 12.1, позволило выявить три петли, образуемые ветвями  $W_{22}(S)$ ,  $W_{23}(S)W_{32}(S)$  и  $W_{12}(S)W_{23}(S)W_{37}^*(S)W_A(S)$ . При этом характеризующий последнюю петлю эквивалентный коэффициент пропускания  $W_{37}^*(S)$  найден по прави-

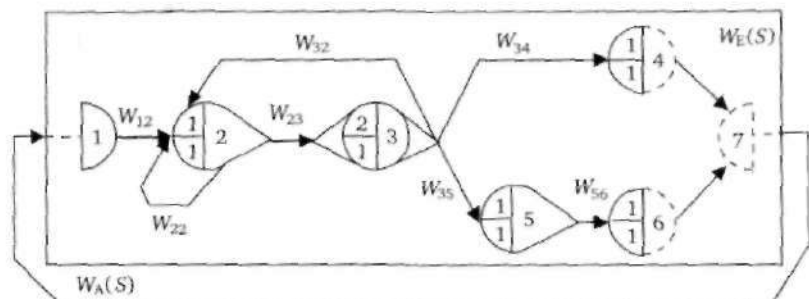


Рис. 12.1. Модифицированная сеть типа GERT

лам «а», «б» и получился равным  $W_{34}(S) + W_{35}(S)W_{56}(S)$ . Считая все три петли петлями первого порядка (по определению) и раскрывая в топологическом уравнении (12.8) содержание первого вычитаемого, приходим к уравнению

$$1 - \sum W^*(L_i) = 1 - W_{22}(S) - W_{23}(S)W_{32}(S) - \frac{W_{12}(S)W_{23}(S)(W_{34}(S) + W_{35}(S)W_{56}(S))}{W_E(S)} = 0, \quad (12.11)$$

решение которого позволило получить аналитическое выражение для искомого здесь коэффициента пропускания исходной (разомкнутой) стохастической сети GERT:

$$W_E(S) = \frac{W_{12}(S)W_{23}(S)(W_{34}(S) + W_{35}(S)W_{56}(S))}{1 - W_{22}(S) - W_{23}(S)W_{32}(S)}, \quad (12.12)$$

Сравнение полученного выражения с формулой (11.6) и другими выведенными ранее зависимостями (11.11) и (11.22) подтверждает структурную идентичность всех этих аналитических моделей. Действительно, ведь их числители отражают пропускную способность одной дуги или ветви, эквивалентной нескольким (последовательно и параллельно соединенным) дугам, а знаменатели — увеличение пропускной способности дуги или всей сети положительными обратными связями. Выявленное качественное сходство подтвердило внутреннее единство всех тех диаграмм влияния типа «дерево», «граф» и «сеть», которые используются в данной работе в качестве основы для прогнозирования меры возможности проявления источников техногенного риска.

А вот о том, как это можно делать путем количественного анализа сетей GERT, интерпретирующих исследуемые здесь опасные процессы

в техносфере, можно будет убедиться, ознакомившись с содержанием следующих параграфов данной главы.

## 12.2. Оценка параметров опасных событий количественным анализом сети GERT

Для проведения априорной количественной оценки перечисленных выше числовых характеристик необходимы сведения о содержании и параметрах технологического процесса, изображенного на рис. 12.1 внутри прямоугольника. Предположим, что имеющаяся там сеть производит условия появления опасных ситуаций в ходе осуществления персоналом какого-либо ОТУ следующих действий:

а) контроль исходного положения электропневмоавтоматики (ветвь 1-2);

б) устранение возможных отклонений (2-2) в положении ее элементов;

в) разъединение и осмотр стыков однотипных коммуникаций: вначале двукратно, а затем однократно (2-3);

г) их состыковка и подготовка к следующим подобным операциям (3-2) при благоприятном исходе (отсутствии ошибок или отказов).

При этом подразумевается возможность:

а) возникновения опасной ошибки персонала (3-4);

б) появления отказа элементов электро-, пневмооборудования (3-5);

в) вывода из строя предусмотренных на такие случаи технических средств защиты (5-6).

Взятые для примера характеристики рассматриваемого технологического процесса — вероятности  $P_{ij}$  наступления его исходов, законы распределения времени выполнения составляющих его операций с их числовыми параметрами и производящими функциями моментов (см. табл. В.6 из приложения данной книги) — приведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1. Количественные характеристики сетевой модели

Код ветви	$P_{ij}$	Закон распределения	Параметры распределения	Производящая функция моментов
1-2	1,0	Константа	$a = 1$	$\exp(aS)$
2-2	0,1	Нормальное	$m = 3, s = 2$	$\exp(mS + 0,5\sigma^2 S^2)$
2-3	0,9	Нормальное	$m = 10, s = 3$	$\exp(mS + 0,5\sigma^2 S^2)$
3-2	0,8	Константа	$a = 2$	$\exp(aS)$
3-4	0,1	Экспонента	$1/a = 0,01$	$1/(1 - 100S)$
3-5	0,1	Экспонента	$1/a = 0,001$	$1/(1 - 1000S)$
5-6	0,1	Экспонента	$1/a = 0,001$	$1/(1 - 1000S)$

Оценку вероятности возникновения  $Q(T)$  опасных ситуаций начнем с определения выражения для коэффициента  $W_E(S)$  пропускания исследуемой сети GERT. После подстановки в формулу (12.12) значений  $W_{ij}(S) = P_{ij} W_{ij}(S)$  из табл. 12.1 и преобразования полученного алгебраического выражения имеем следующее его выражение:

$$W_E(S) = \frac{0,9 \exp(11S + 4,5S^2) \left[ \frac{0,1}{1-100S} + \left( \frac{0,1}{1-1000S} \right)^2 \right]}{1 - 0,1 \exp(3S + 2S^2) - 0,9 \exp(10S + 4,5S^2) \cdot 0,8 \exp(2S)}. \quad (12.13)$$

Так как (по определению) вероятность  $Q(T)$  появления опасной ситуации получается заменой на нуль в выражении (12.13) параметра  $S$ , то после соответствующих преобразований получаем

$$Q = W_E(S=0) = 1 \cdot 0,9 \cdot (0,1 + 0,01) / (1 - 0,1 - 0,9 \cdot 0,8) = 0,55. \quad (12.14)$$

Для оценки математического ожидания  $M(T)$  и дисперсии  $D(T)$  необходимого для этого времени нужно знать производящую функцию моментов  $M_E(S)$ , аналитическое выражение которой было получено с помощью формулы (12.3):  $M_E(S) = W_E(S)/Q$ . С учетом этого имеем

$$M_E(S) = \frac{1,63 \exp(11S + 4,5S^2) \cdot \left[ \frac{0,1}{1-100S} + \left( \frac{0,1}{1-1000S} \right)^2 \right]}{1 - 0,1 \exp(3S + 2S^2) - 0,72 \exp(12S + 4,5S^2)}. \quad (12.15)$$

Имея аналитическое выражение производящей функции, можно рассчитать среднее время  $M(T)$  до возникновения опасной ситуации, которое определяется дифференцированием правой части формулы (12.15) и последующей заменой в полученном выражении параметра  $S$  на нуль. Учитывая сложность функции (12.15), взятие ее первой производной осуществлено с помощью программы *Wolfram-alpha*. Однако из-за громоздкости полученного при этом промежуточного результата вместо него здесь приводятся лишь результаты расчета первого и второго моментов, проведенного по найденным таким способом производным.

При этом среднее время до достижения узла 7 этой сетевой модели оказалось равным

$$M(T) = \left. \frac{\partial M_E(S)}{\partial s} \right|_{s=0} = \frac{(1,63 \cdot 1,21 + 195)0,18 + 0,0652 \cdot 8,9}{0,0144} = 2502 \text{ (с)}. \quad (12.16)$$

Подобным образом оценена и дисперсия найденной случайной оценки этого времени:

$$D(T) = \left. \frac{\partial^2 M_E(S)}{\partial s^2} \right|_{s=0} = \frac{(14,67 + 197,23)0,1 + (179,7 + 14,67 + 17,97)0,01}{0,0002} = 11\,656 \text{ (с}^2\text{)}. \quad (12.17)$$

Последние результаты нужно понимать следующим образом. Моделируемый процесс предрасположен к опасным ситуациям: их появление возможно в 55 из 100 его реализаций. В случае нормального распределения требуемого для этого случайного времени (что логично вытекает из теоремы Ляпунова — см. параграф 2.6) возникновение подобных ситуаций возможно в интервале времени  $M(T) \pm \pm (D(T))^{1/2} = 42 \pm 5,5$  мин после начала соответствующей работы.

Что касается *адекватности* полученных соотношений, то она подтверждена проверкой выражения (12.12) на соответствие размерностей его параметров и реакции его левой части на изменение. При этом оказалось, что увеличение всех параметров способствует росту коэффициента  $W_E(S)$  пропускания сети GERT, но его величина не превышает единицы при любом их варьировании. Ведь сумма пропускных способностей ветвей 3-4 и 3-5, 5-6 не может превышать эквивалентную величину предшествующих им ветвей, а потому соблюдаются следующие два условия:  $W_{23}(S) \leq W_{12}(S) + W_{22}(S) + W_{32}(S)$  и  $W_{32}(S) + W_{34}(S) + W_{35}(S) \leq W_{23}(S)$ .

Изложенное выше позволяет утверждать о перспективности только что рассмотренного метода прогнозирования техногенного риска с помощью диаграмм влияния типа GERT<sup>1</sup>. При этом возможна оценка не только вероятности, но и времени до проявления его конкретных источников на исследуемых ОТУ. Вот почему нужно согласиться с автором [51], утверждающим, что интерпретация технологических процессов в виде сетей стохастической структуры типа GERT может оказаться полезной и для обоснования требований к их качеству, так как при этом учитываются все наиболее существенные факторы.

Вместе с тем нельзя игнорировать и тот факт, что использование данного метода требует информации о виде и числовых характеристиках случайных распределений каждой дуги сети GERT, которая не всегда доступна. Свободным от этого недостатка является прогнозирование вероятности техногенных происшествий путем логико-лингвистического и имитационного моделирования процесса их появления, которое основано на рассматриваемых в данной главе диаграммах типа «сеть стохастической структуры».

<sup>1</sup> Еще один пример использования данных моделей для прогноза параметров безопасной эксплуатации критически важной подсистемы конкретного ОТУ будет рассмотрен ниже (см. параграф 20.5).



## 12.3. Логико-лингвистическая модель происшествия в человекомашиной системе

Для количественной оценки вклада всех факторов, реально влияющих на процесс возникновения техногенных происшествий при функционировании человекомашиных систем, рассмотренные выше математические модели оказываются малоприменимыми. Это обусловлено не только большим числом значимых для этого свойств этих систем (см. рис. 6.4), но и трудностью их формализации вследствие нечеткой определенности соответствующих параметров. Естественно, что данная особенность заметно ограничивает применение рассмотренных до сих пор методов графо-аналитического моделирования в системном исследовании процесса возникновения техногенных происшествий.

Наиболее перспективным подходом к учету всех существенных факторов при прогнозировании техногенного риска является логико-лингвистическое моделирование происшествий в человекомашиных системах, ставшее возможным благодаря появлению современных компьютеров и способов представления нечетко определенных переменных. Основными достоинствами указанного метода обычно считают высокую гибкость и целенаправленность, возможность учета сколь угодно большого числа важных факторов, оперативность оценки характера реакции системы на предполагаемое изменение отдельных свойств ее элементов или их совокупностей.

Процедура логико-лингвистического моделирования с целью прогноза вероятности возникновения происшествий и оценки вклада в них учитываемых факторов человекомашиной системы должна включать следующие основные этапы:

- а) описание процесса возникновения отдельных предпосылок и их причинной цепи на качественном уровне с применением логических условий и лингвистических переменных;
- б) последующую формализацию полученной при этом вербальной модели, т.е. ее представление в виде диаграммы влияния типа «сеть стохастической структуры»;
- в) разработку имитационного алгоритма и соответствующей ему компьютерной программы;
- г) проведение с их помощью серии машинных экспериментов.

Естественно (см. параграф 6.2), что учитываемыми при этом факторами следует считать как психофизиологические свойства персонала ОТУ и структуру возложенных на него алгоритмов, так и все то, что в основном определяет эргономичность и надежность используемой им техники, комфортность рабочей среды и качество технологии работ. Именно такой системный подход применен ниже при разработке стохастической сети GERT и основанного на ней имитационного алгоритма, пригодного для машинного моделирования про-

цесса возникновения предпосылок и перерастания их в причинную цепь техногенного происшествия. Первооснова такой сети представлена на рис. 12.2.

В верхней части изображенной полувербальной модели находятся техногенные происшествия разного типа, а ниже — предшествующие им особые ситуации и предпосылки к ним. Реализация каждого из подобных событий, обозначенных ромбиками или прямоугольниками, имеет случайный характер и может быть осуществлена различными способами. А вот основание этой модели и все остальные ее элементы образованы уже событиями и свойствами человекомашиной системы вместе с объединяющими их узлами и связями.

Заметим также, что в основу идеи, использованной при данной интерпретации процесса появления происшествий, положен учет влияния конкретных свойств человекомашиной системы на качество выполнения основных этапов операторской деятельности:

а) восприятие и дешифровка информации о ходе выполняемой технологической операции;

б) структурирование полученных данных в соответствии с решаемой им задачей;

в) выявление отклонений параметров этой системы от требований технологии работ;

г) оценка необходимости и способов вмешательства в процесс человека;

д) сравнительная оценка возможных решений и выбор из них конкурентоспособных;

е) прогнозирование степени их приемлемости и эффективности;

ж) принятие и реализация решения на корректировку процесса оператором при необходимости.

Перечисленные элементы алгоритма и процесса возникновения при этом цепи предпосылок к возможным происшествиям в человекомашиной системе показаны на рис. 12.2 в прямоугольниках с двойной рамкой, а связи между ними — уже привычными символами (см. рис. 9.2).

Не отрицая общности рассуждений, рассмотрим процесс возникновения и развития причинной цепи техногенного происшествия при функционировании какой-либо человекомашиной системы (выполнении технологической операции одним работающим на отдельном образце соответствующего оборудования). Например, интерпретируя условия появления аварии при перевозке какого-либо АХОВ автотранспортом. При этом в качестве «машины» будет подразумеваться автомобиль, «человека» — управляющий им водитель, а «рабочей среды» — видимый ему из кабины участок дороги со средствами регулирования движения, другими неподвижными и движущимися объектами.

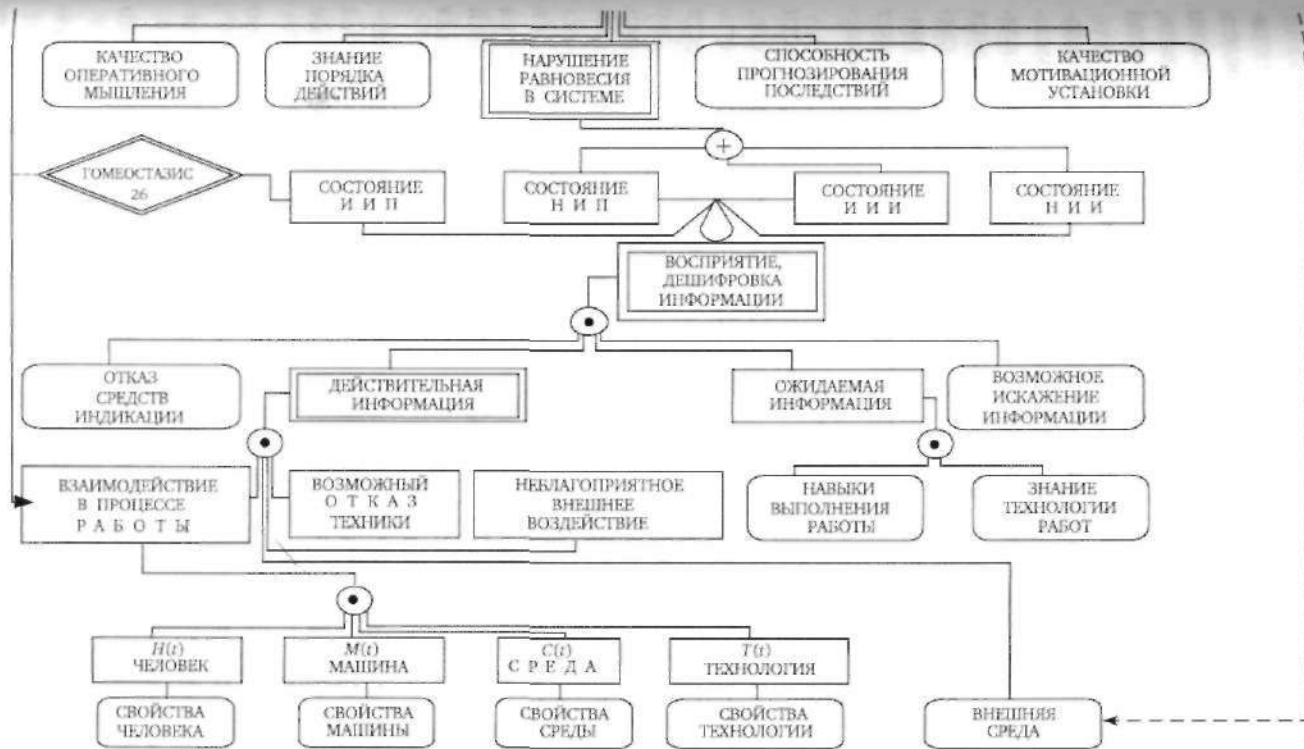
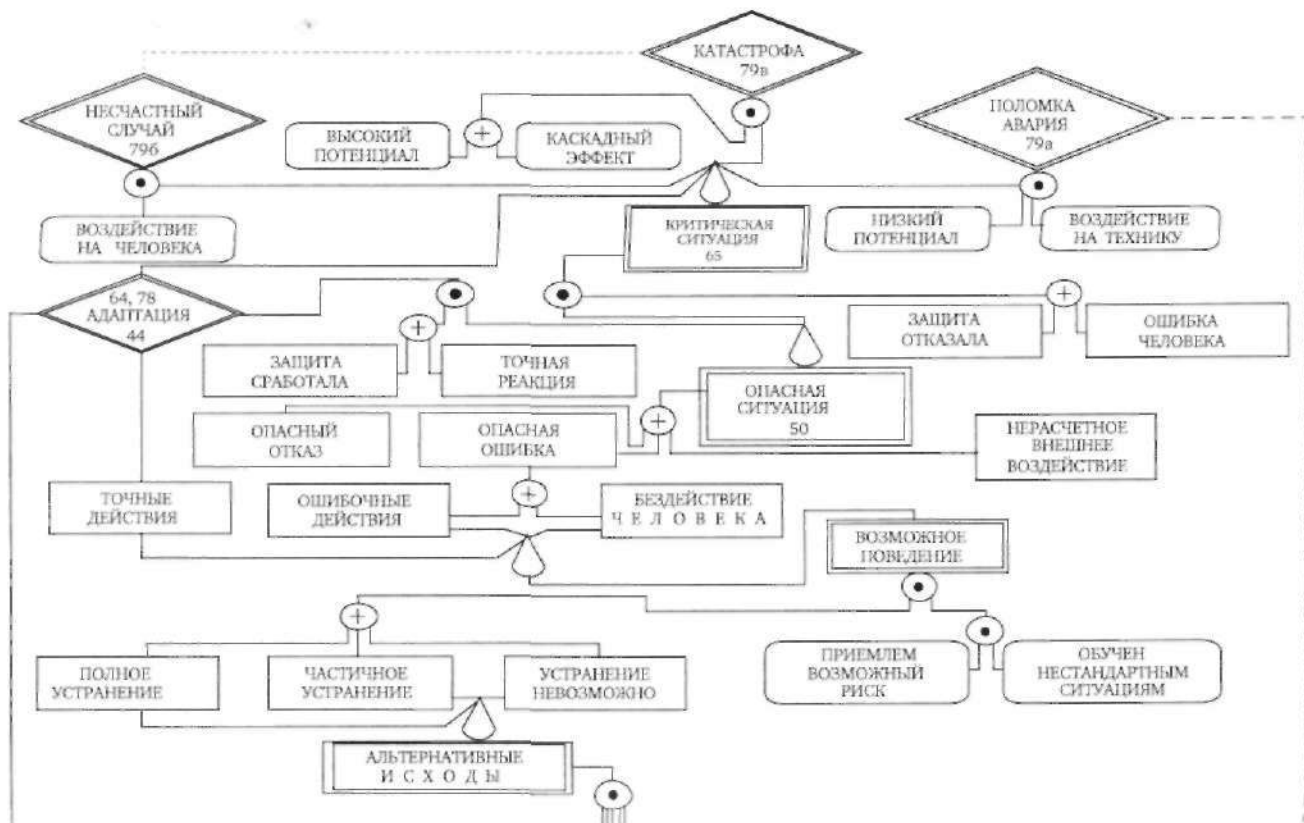


Рис. 12.2. Модель возникновения происшествия в человекомашиной системе

Описание модели проведем снизу вверх, последовательно поясняя взаимодействие элементов, расположенных на разных уровнях.

Что касается ее нижней левой части, то обратим внимание на прямоугольники, указывающие на возможные неисправности тех средств индикации состояния автомобиля и дорожных условий, которыми пользуется водитель. Данные элементы сети могут свидетельствовать, например, о возникновении несоответствия между информационной моделью водителя и реальными дорожными условиями.

В правой нижней части модели отражен тот факт, что любой человек-оператор, руководствуясь знанием технологии работ и имеющимся у него опытом, обычно создает когнитивную модель выполняемой операции, позволяющую ему после выполнения конкретных действий ожидать определенную информацию и изготавиться к следующей операции. Однако вследствие различных причин действительная информация о результате уже выполненного действия может отличаться от информации, ожидаемой человеком, что может им восприниматься или не восприниматься в последующем.

Например, при приближении к перекрестку или необходимости совершения там маневра водитель должен сбавить обороты двигателя, нажать на педаль привода сцепления или тормоза, а затем повернуть рулевое колесо. При этом он ожидает снижение шума в одном месте (от двигателя) и его появление в другом (в районе колес), а также готовится к восприятию инерционной нагрузки, обусловленной изменением вектора скорости автомобиля. Однако этого может не произойти из-за появления возможных: а) ошибок водителя (не воспринял изменение уровней шума и бокового ускорения); б) отказов задействованных при маневре элементов автомобиля (акселератора либо тормозного и рулевого устройств); в) нерасчетных воздействий дорожного покрытия (например, его низкого трения из-за оледенения или наличия масляной пленки).

Иначе говоря, в результате восприятия и дешифровки информации о состоянии рассматриваемой здесь человекомашиной системы и сравнения ее с ожидаемой возможны следующие альтернативные исходы:

а) действительная информация идентична ожидаемой и правильно воспринята водителем (см. рис. 12.2 — состояние ИИП);

б) действительная информация не идентична ожидаемой, но правильно им понята (состояние НИП);

в) действительная информация идентична ожидаемой, однако искажена водителем (состояние ИИИ);

г) действительная информация не идентична ожидаемой и искажена водителем при дешифровке или восприятии (состояние НИИ).

Указанные четыре события представляют собой полную группу исходов приема и дешифровки информации и располагаются над соот-

ветствующими стохастическими узлами сети. При этом три последних случая нужно истолковывать как появление возмущений, приведших к нарушению равновесия в человекомашиной системе, тогда как первый исход можно считать успешным (в смысле отсутствия условий для зарождения причинной цепи происшествия), т.е. там имеет место гомеостазис (событие 26). Достижение и сохранение системой динамического равновесия свидетельствует о завершении выполняемого этапа технологической операции и переходе к следующему, на что указывает логическая связь с нижними элементами модели.

Если в исследуемой человекомашиной системе нарушается равновесие, то принципиально возможны следующие три альтернативных исхода: его полное или частичное восстановление, а также невозможность своевременного устранения возмущения и предупреждения вследствие этого опасных последствий (см. соответствующие события в центральной части рис. 12.2). Например, в случае обнаружения водителем факта или тенденции к утрате системой «грузовик с АХОВ — дорога» динамического равновесия у него может возникнуть потребность в принятии решения о необходимости вмешательства в возникшую нестандартную ситуацию с целью ее корректировки.

Допустим, что после выполнения обычных (перед запрещающим знаком светофора) действий этот человек-оператор обнаружил недостаточное снижение скорости автомобиля. Далее он мог действовать, например, по одному из следующих вариантов: а) осознав недопустимость въезда на перекресток и зная о возможности торможения автомобиля стояночным тормозом, водитель попытается сбавить скорость с его помощью; б) понимая невозможность сделать это из-за скользкого покрытия или ненадежной работы стояночного тормоза, он примет решение об увеличении скорости в надежде преодолеть перекресток до въезда на него автомобилем с поперечной дороги; в) видя, что наперерез и слева по отношению к его грузовику быстро приближается легковой автомобиль, а справа, но чуть дальше, — уже грузовик, водитель не совершит каких-либо действий, растерявшись или понадеявшись на счастливый исход.

При принятии решений о порядке действий в подобных условиях человек обычно руководствуется субъективно оцененной им мерой опасности и собственными возможностями, определяемыми психофизиологическими качествами — оперативностью мышления, знанием порядка действий в сходных нестандартных ситуациях, способностью прогнозировать их последствия и уровнем мотивации. С учетом этого он выбирает «оптимальную» для него альтернативу и осуществляет наилучшие в его представлении действия, которые в действительности могут быть либо точными, либо ошибочными. Отказ от каких-либо действий вследствие замешательства или потери самообладания

учтен на рис. 12.2 исходом «Бездействие человека», расположенным над соответствующим стохастическим узлом-разветвлением.

Если принятое решение и действия водителя грузовика, перевозящего АХОВ, окажутся точными, то они могут вернуть соответствующую человекомашинную систему в состояние равновесия — за счет адаптации к возникшему возмущению (событие 44). В других случаях в этой системе появится опасная ситуация, что и показано на модели событием 50. К ее возникновению могут привести также отказы других ответственных элементов автомобиля или опасные внешние воздействия на человека и технику рабочей среды.

Появившаяся в рассматриваемой системе опасная ситуация может перерасти в критическую (событие 65), т.е. привести к взаимному совмещению незащищенных объектов и зоны действия возникшей опасности, либо завершиться адаптацией к опасной ситуации (событие 64). Возможность такой адаптации будет зависеть от особенностей возникшей дорожно-транспортной ситуации: качества и взаимной совместимости конкретных компонентов данной системы и ее окружения — технических средств обеспечения безопасности дорожного движения, обученности водителей других транспортных средств и оказавшихся вблизи пешеходов точным действиям в нештатных ситуациях и т.п.

Подобно обстоит дело и с критической ситуацией. Она может завершиться либо еще одной адаптацией человекомашинной системы (событие 78), либо фактом проявления аварийности или травматизма, т.е. возникновением одного из событий, помеченных на рис. 12.2 номерами 79а, 79б и 79в. Конкретный вид происшествия (несчастный случай, катастрофа, авария или поломка) будет определяться спецификой возникшей ситуации — каков потенциал случайно возникшего опасного фактора, какие из незащищенных объектов оказались в зоне его появления, какому разрушительному воздействию они подверглись.

В частности, при низком потенциале опасного фактора и воздействии его на незащищенные элементы транспортной техники и рабочую среду возможны поломки или аварии, иногда сопровождающиеся загрязнением природной среды. При воздействии же этого фактора только на людей возможны несчастные случаи, включая их гибель. В тех случаях, когда выход из строя одних компонентов человекомашинной системы ведет к неизбежному выходу из строя других (каскадный эффект), а также при очень больших потенциалах аварийно высвободившегося энергозапаса могут возникать катастрофы.

Применительно к рассматриваемой ситуации подобные исходы могут проявиться в следующем. При малых относительной скорости и массе столкнувшихся автомобилей они сами и их водители могут отделаться лишь незначительными повреждениями. В случае

же «въезда» на большой скорости легкового автомобиля в грузовик с АХОВ, внезапно оказавшийся на перекрестке, помимо неизбежных поломок могут пострадать и оба водителя.

Наконец, если в результате столкновения на большой скорости автомобилей произошла утечка, возмещение или взрыв находящегося в одном из них АХОВ, то данное дорожно-транспортное происшествие может стать катастрофическим по причине гибели оказавшихся вблизи пешеходов и материального ущерба транспортным средствам. Возможность влияния одних техногенных происшествий на другие (эффект домино) учтена в показанной на рис. 12.2 модели пунктирной линией, идущей от верхних событий сети к нижним.

В завершение пояснения модели рис. 12.2 обратим внимание на ее соответствие современным представлениям о закономерностях появления происшествий. Свидетельства тому, например, — результаты сделанного выше (см. параграф 6.2) анализа обстоятельств их возникновения. Кроме того, рассмотренная здесь семантическая модель учитывает в качестве лингвистических переменных большое число реально действующих факторов (см. рис. 6.4), большинство из которых имеет нечетко определенную природу.

Однако построение подобных моделей представляет лишь подготовительный этап к последующему имитационному моделированию возникновения происшествий в человекомашинных системах. Необходимые для этого процедуры дальнейшей формализации модели и разработки соответствующего машинного алгоритма излагаются ниже.

## **12.4. Алгоритм имитационного моделирования процесса появления происшествий на основе сети GERT**

Приемлемость метода имитационного моделирования для априорной оценки меры возможности появления техногенных происшествий может быть обоснована по меньшей мере двумя соображениями. Во-первых, выполнение большинства проводимых на ОТУ операций удобно представлять в виде процесса функционирования какой-либо человекомашинной системы. При этом успешное или неуспешное завершение каждой такой операции будет случайным исходом — соответственно появлением или отсутствием в ней техногенного происшествия. Во-вторых, если же рассматривать конкретную технологическую операцию, многократно выполняемую на однотипных ОТУ, то можно утверждать и о массовом характере интересующих нас исходов.

Следовательно, требование к массовости и стохастичности исследуемого процесса соблюдается, что позволяет использовать метод имитационного моделирования для прогнозирования рассматриваемых

мого здесь параметра аварийности и травматизма. Для пояснения идеи имитационного моделирования техногенных происшествий в человекомашиной системе обратимся к рис. 12.3, где рассмотренная выше семантическая модель представлена уже в виде «чистой» сети стохастической структуры типа GERT. Эта сеть содержит узлы и дуги, которые в построенном на ее основе машинном алгоритме будут определять условия генерирования, обработки или передачи потока цифровой информации, указывающей на вклад учитываемых при моделировании факторов аварийности и травматизма.

Для удобства восприятия источники такой информации (генераторы случайных чисел, представляющие свойства человекомашиной системы) помечены волнистыми стрелками, входящими в соответствующие узлы сети GERT, а все ее узлы и некоторые дуги — цифрами, часть из которых уже использована в предыдущей модели (см. рис. 12.2). При этом все узлы данной сети имеют одинаковые (единичные) степени свободы для первой и последующих реализаций (в смысле приема сигнала, поступающего от входящих дуг).

Кроме того, только три узла этой сети 23, 33 и 35 имеют более двух исходящих дуг. На рис. 12.2 они соответствовали выполнению человеком следующих этапов операторского алгоритма:

- а) восприятие и дешифровка информации о состоянии человекомашиной системы;
- б) принятие решения о необходимости и порядке устранения причин нарушенного в ней равновесия;
- в) практическая реализация оператором принятого решения.

Обратим внимание также на события, закодированные числами 26, 44, 50, 64, 65, 78, 79 и оснащенные спиралевидными исходящими стрелками: при моделировании они будут играть роль узлов-статистик, т.е. регистрировать факт достижения всех этих событий потоком цифровой информации.

Исходными данными, необходимыми для имитационного моделирования, служит набор тех свойств человекомашиных систем (см. параграф 6.2), которые наиболее значимо влияют на появление техногенных происшествий, а также относительные оценки качества каждого такого фактора и его вклада в появление и развитие причинной цепи соответствующих предпосылок. Распределение качества всех учитываемых свойств-факторов этой системы будет задаваться при моделировании плотностью  $f_x(K)$  вероятности или функцией  $\pi_x(K)$  принадлежности соответствующих лингвистических переменных (см. параграф 2.2).

Что касается способов представления тех исходных данных, которые имеют нечетко определенную природу и используются при моделировании, то они задаются с помощью универсальной шкалы, приведенной в табл. 12.2.



Таблица 12.2. Лингвистические и числовые оценки универсальной шкалы качества

Относительная и четырехбалльная оценки	Лингвистическая оценка										
	Очень, очень низкое (К1)	Очень низкое (К2)	Низкое (К3)	Ниже среднего (К4)	Среднее (К5)	Выше среднего (К6)	Хорошее (К7)	Очень хорошее (К8)	Высокое (К9)	Очень высокое (К10)	Очень, очень высокое (К11)
$K \in [0; 1]$	0,08	0,17	0,25	0,33	0,41	0,5	0,58	0,66	0,75	0,83	0,92
Плохо	0,3	0,7	1,0	0,7	0,3	0	0	0	0	0	0
Удовлетворительно	0	0	0,3	0,7	1,0	0,7	0,3	0	0	0	0
Хорошо	0	0	0	0	0,3	0,7	1,0	0,7	0,3	0	0
Отлично	0	0	0	0	0	0	0,3	0,7	1,0	0,7	0,3

Для пояснения механизма имитационного моделирования происшествий в человекомашиной системе обратимся к рис. 12.4.

Ломаной линией (а) на этом рисунке показана треугольная функция  $\pi_x(K)$  принадлежности оценки «хорошо», а прямой (б) — равномерно распределенная плотность  $f_x(K)$  вероятности качества двух взятых для примера свойств этой системы (факторов аварийности и травматизма). Их вклад в появление и развитие причинной цепи техногенного происшествия зависит от присвоенных оценок качества и индекса  $I_j$  потенциальной опасности. При этом величина последнего может определяться с помощью статистических данных по аварийности и травматизму (например, по процентному распределению соответствующих факторов, приведенных на рис. 6.4). В частности, найденные подобным образом значения этих индексов приведены в табл. 12.3 совместно с кодами и наименованиями каждого учтенного в модели фактора-свойства человекомашиной системы.

Сущность идеи, положенной в основу имитационного моделирования происшествий в человекомашиных системах, состоит в следующем. Генераторы случайных чисел (см. левую часть рис. 12.4), настроенные на равномерно или треугольно распределенные функции  $f_x(K)$  и  $\pi_x(K)$ , выдают при опросе случайные оценки качества, значения которых влияют на индексы  $I_j$  потенциальной опасности. Количество таких генераторов соответствует числу учитываемых факторов, а выданные ими значения индексов  $I_j$  потенциальной опасности могут имитировать предрасположенность конкретных свойств человекомашиной системы к формированию предпосылок к происшествию.

В самом деле, если качество компонентов конкретной системы имеет низкие оценки, то генераторы чаще будут выдавать максимальные величины соответствующих случайных чисел-индексов: чем ниже оценка  $K_j$  качества какого-либо свойства человекомашиной системы, тем наиболее вероятно принятие этим числом наибольшего значения

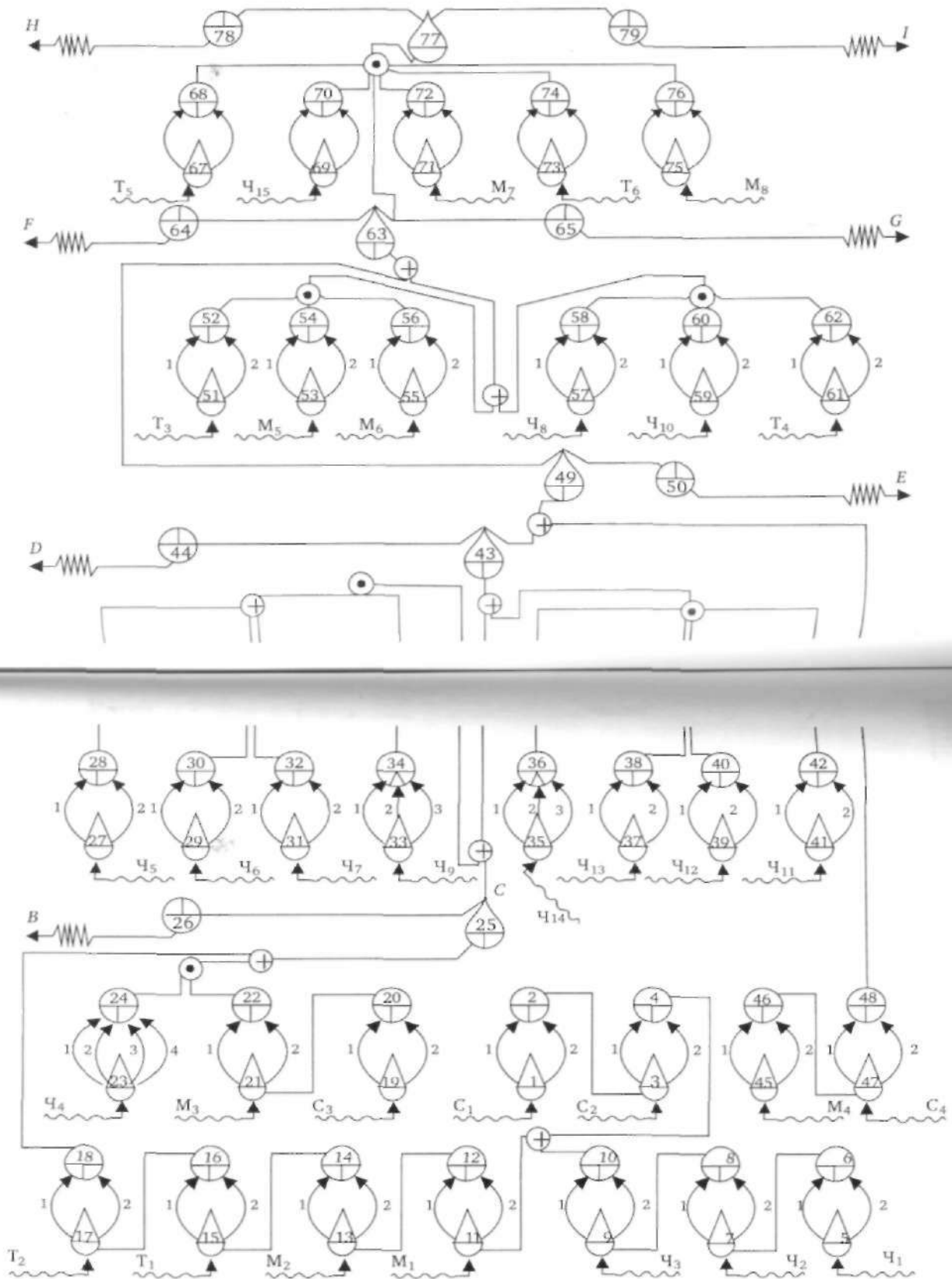


Рис. 12.3. Сеть GERT для имитационного моделирования происшествий



Рис. 12.4. Иллюстрация механизма имитационного моделирования

Таблица 12.3. Состав и характеристика учитываемых факторов

Компонент	Код	Наименование моделируемых факторов	Номер узла		Индекс $I_j$
			исток	сток	
Человек	Ч <sub>1</sub>	Наличие практических навыков выполнения операции	5	6	1√0
	Ч <sub>2</sub>	Знание технологии работ на данном оборудовании	7	8	2√0
	Ч <sub>3</sub>	Пригодность по психофизиологическим показателям	9	10	1√0
	Ч <sub>4</sub>	Восприятие и дешифровка информации о состоянии системы	23	24	1√2√3√0
	Ч <sub>5</sub>	Оперативность мышления человека-оператора	27	28	1√0
	Ч <sub>6</sub>	Знание порядка действий в нестандартных ситуациях	29	30	1√0
	Ч <sub>7</sub>	Способность прогнозировать последствия своих решений	31	32	1√0
	Ч <sub>8</sub>	Технологическая дисциплинированность	57	58	2√0
	Ч <sub>9</sub>	Качество принятия решения	33	34	1√2√0
	Ч <sub>10</sub>	Знание опасных факторов выполняемой операции	59	60	1√0
	Ч <sub>11</sub>	Осведомленность о последствиях аварийных ситуаций	41	42	1√0
	Ч <sub>12</sub>	Знание порядка действий в аварийных ситуациях	39	40	1√0
	Ч <sub>13</sub>	Обученность действиям в аварийных ситуациях	37	38	2√0
	Ч <sub>14</sub>	Точность действий по ликвидации аварийных ситуаций	35	36	2√1√0
	Ч <sub>15</sub>	Безошибочность действий в критических ситуациях	69	70	2√0
Машина	М <sub>1</sub>	Качество конструкции рабочего места человека-оператора	11	12	1√0
	М <sub>2</sub>	Степень учета особенностей работоспособности человека	13	14	2√0
	М <sub>3</sub>	Безотказность контрольно-измерительных приборов	21	22	1√0
	М <sub>4</sub>	Энергоемкость источников опасных техногенных факторов	45	46	2√0
	М <sub>5</sub>	Безотказность элементов, удерживающих опасные факторы	53	54	2√0
	М <sub>6</sub>	Длительность действия опасных производственных факторов	55	56	1√0
	М <sub>7</sub>	Уровень потенциала опасных производственных факторов	71	72	1√0
	М <sub>8</sub>	Безотказность технических средств защиты и безопасности	75	76	2√0

Компонент	Код	Наименование моделируемых факторов	Номер узла		Индекс $I_j$
			исток	сток	
Среда	$C_1$	Комфортность среды по физико-химическим параметрам	1	2	$1 \vee 0$
	$C_2$	Качество информационной модели состояния среды	3	4	$2 \vee 0$
	$C_3$	Возможность неблагоприятных воздействий среды на систему	19	20	$1 \vee 0$
	$C_4$	Возможность нерасчетных внешних воздействий на систему	47	48	$2 \vee 0$
Технологии	$T_1$	Удобство подготовки и выполнения работ на технике	15	16	$1 \vee 0$
	$T_2$	Удобство технического обслуживания и ремонта оборудования	17	18	$2 \vee 0$
	$T_3$	Сложность алгоритмов функционирования человека-оператора	51	52	$1 \vee 0$
	$T_4$	Возможность появления персонала в опасной зоне	61	62	$1 \vee 0$
	$T_5$	Возможность появления в опасной зоне других незащищенных элементов	67	68	$1 \vee 0$
	$T_6$	Надежность организационно-технических средств обеспечения безопасности	73	74	$2 \vee 0$

индекса, приведенного в правой колонке табл. 12.3. А так как все свойства связаны между собой дугами сети GERT, то результат обработки этой цифровой информации ее узлами логического сложения и перемножения будет характеризовать возможность появления и развития причинной цепи предпосылок к техногенному происшествию.

Ведь нетрудно понять, что обработка логическими узлами значений  $I_j$  будет формировать суммарный индекс  $I_\Sigma$  потенциальной опасности моделируемого процесса, а его величина может указывать на возможность образования причинной цепи происшествия в человеко-машинной системе. Это будет определяться не только случайно выбранными в конкретной реализации значениями отдельных  $I_j$ , но также логикой их сложения и перемножения, заданной соответствующими узлами той сети GERT, которая представлена на рис. 12.3.

В свою очередь, полученная таким образом величина  $I_\Sigma$  может указывать на предрасположенность исследуемой системы к происшествиям, оцениваемую вероятностями не только возникновения возмущений, опасных и критических ситуаций, но и ее адаптации вследствие их своевременной ликвидации. Последнее объясняется тем, что случайная величина  $I_\Sigma$ , значение которой пропорционально вероятности образования причинной цепи техногенного происшествия, способна не только расти, но и уменьшаться, вплоть до обнуления.

Например, сохранение или рост индекса  $I_{\Sigma}$  будет иметь место после объединения логическим условием ИЛИ поступающих на его вход случайных чисел  $I_j$ . Допустим, при алгебраическом сложении соответствующего вклада тех первых девяти узлов-генераторов сети GERT, которые соответствуют факторам с кодами  $C_1$  и  $C_2$ ,  $Ч_1$  —  $Ч_3$ ,  $M_1$  и  $M_2$ ,  $T_1$  и  $T_2$ . И напротив, уменьшение  $I_{\Sigma}$ , т.е. обрыв причинной цепи техногенного происшествия, будет интерпретироваться в тех случаях, когда хотя бы один из генераторов, инцидентных логическому условию И, выдаст нулевое значение индекса  $I_j$ . Например, когда узлы 23, 24 этой сети (фактор  $Ч_4$ ) симулируют безошибочное восприятие и дешифровку информации оператором, несмотря на ненулевые значения индексов  $I_{19}$  и  $I_{21}$ .

Естественно, что каждая машинная реализация конкретной технологической операции будет сопровождаться регистрацией одного из тех событий, которые помечены в левой и правой частях рис. 12.3 исходящими из них волнистыми стрелками. Это означает, что в одних случаях в исследуемой человекомашинной системе (ЧМС) может фиксироваться гомеостазис или адаптация к возникшим ошибкам, отказам и нерасчетным внешним воздействиям, а в других — опасная и критическая ситуации, т.е. достижение узлов 26, 44 и 50, 65 потоком цифровой информации. Если последующие значения индекса накопленной опасности не превысят некоторых предельных значений, то в моделируемой системе будет регистрироваться адаптация и к этим ситуациям (узлы 64 и 78), тогда как дальнейший рост  $I_{\Sigma}$  может завершиться уже техногенным происшествием — появлением одного из событий 79а, 79б или 79в в верхней части рис. 12.3.

## 12.5. Прогнозирование вероятности происшествий методом имитационного моделирования

Изложенный выше алгоритм логико-лингвистического моделирования процесса возникновения техногенных происшествий в человекомашинных системах реализован при создании соответствующего программного комплекса, названного HAZARD. Его краткое описание, содержащее сведения об архитектуре и порядке практического использования путем проведения машинных экспериментов, приведено в приложении Е.2 настоящей книги. Интерфейс пользователя этого комплекса совместно с результатами решения одной из практически важных задач показан на рис. 12.5.

Осуществление имитационных машинных экспериментов в системе типа HAZARD позволяет решать следующие три важные задачи:

а) выявлять среди рассматриваемых свойств конкретной системы наиболее существенные по вкладу в аварийность и травматизм;

**Hazard 2.0**

File Help

Моделирование | Комплекс мер

Исследуемые факторы системы Человек-Машина-Среда (ЧМС)

Человек | Машина | Рабочая среда | Технология

фактор	оценка
T01 Удобство подготовки и выполнения работ	Среднее
T02 Удобство технического обслуживания и ремонта	Низкое
T03 Сложность алгоритмов оператора	Большая
T04 Возможность появления человека в опасной зоне	Очень, очень низкая

Результаты моделирования

Цель	Возможные состояния	Мера возможности	Сред.	
B	Гомеостазис	0.95683105468750	0.002	
C	Нарушение ==	0.04316889953613	0.002	
D	Адаптация D	0.02792239990234	0.001	
E	Оп. ситуация	0.01524649963379	0.00122331752777	156
F	Адаптация F	0.01181474990845	0.00107408866882	121
G	Кр. ситуация	0.00343175010681	0.00057984848022	35
H	Адаптация H	0.00286650009155	0.00054740982056	28
I	Происшествие	0.00056525001526	0.00022676684856	7

**Hazard - Монитор**

Программа Hazard 2.0 моделирует процесс возникновения происшествия в системе Человек-Машина-Среда (ЧМС). Система ЧМС достаточно универсальна и может описывать большинство реальных производственных, технологических и транспортных процессов. Конкретная ЧМС характеризуется определенным набором факторов, влияющих на процесс возникновения происшествия. Поэтому необходимо определить с оценками эти факторы для Вашей ЧМС, что можно сделать в разделе "Исследуемые факторы ЧМС". (По умолчанию исследуемые факторы уже имеют некоторые значения). Далее следует определить Параметры моделирования.

**Параметры моделирования**

Число опытов: K = 2000

Число итераций модели в одном опыте: N = 10000

Время работы программы при заданных K и N: 0.01 03

Запуск моделирования

Пуск | Hazard 2.0 | 13:37

Рис. 12.5. Интерфейс экспертной системы HAZARD

б) проводить сравнительную оценку вероятности появления техногенных происшествий при выполнении однотипных технологических операций;

в) оценивать эффективность различных организационно-технических мероприятий, предлагаемых для ее снижения.

Для решения каждой из трех указанных задач необходимо не менее двух машинных экспериментов, отличающихся следующими исходными данными. Для второй (б) задачи — оценками качества соответствующих свойств аналогичных человекомашинных систем, функционирующих с целью выполнения одной и той же операции на однотипных ОТУ. Для первой и третьей задач — различными оценками качества этой же системы, зарегистрированными до и после внедрения каких-либо организационно-технических мероприятий по повышению безопасности функционирования подобных систем и ОТУ в целом.

Что касается машинных экспериментов, то каждый из них зависит от реально наблюдаемой частоты регистрируемых событий и требуемой точности оценки их вероятностей, что может потребовать от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч имитаций конкретной технологической операции. По результатам проведения отдельного эксперимента рассчитываются выходные параметры, перечень которых приведен в табл. 12.4.

Таблица 12.4. Характеристика выходных параметров моделирования

Параметр	Обозначение
Вероятности появления событий:	
динамического равновесия (гомеостазиса)	$P_{26}$
адаптации к возмущению (адаптации 1)	$P_{44}$
опасной ситуации	$P_{50}$
адаптации 2 (к опасной ситуации)	$P_{64}$
критической ситуации	$P_{65}$
адаптации 3 (к критической ситуации)	$P_{78}$
происшествия	$P_{79}$
<b>Значение и числовые характеристики распределения <math>I_z</math>:</b>	<b>Значение индекса <math>I_z</math></b>
математическое ожидание $M(I)$	МОЖ
стандартное отклонение $s_i$	СО
наименьшее значение $I_{z,\min}$	MIN
наибольшее значение $I_{z,\max}$	MAX



Параметры отдельного машинного эксперимента, свидетельствующие о продолжительности и точности имитационного моделирования (числе опросов каждого генератора случайных чисел и дисперсии сделанных при этом оценок), указаны в табл. 12.5.

Таблица 12.5. Параметры результатов машинного эксперимента

Наименование параметров	Отсеивающий эксперимент	Статистическое оценивание
Число имитаций выполнения работ $N_j$	6000	12 000
Дисперсии оценок вероятностей:		
$P_{26}$	0,0000532	0,0000190
$P_{44}$	0,0001020	0,0000630
$P_{50}$	0,0001210	0,0000660
$P_{64}$	0,0001240	0,0000480
$P_{65}$	0,0000108	0,0000088
$P_{78}$	0,0000143	0,0000060
$P_{79}$	0,0000263	0,0000112

Из приведенных таблиц ясно, что в каждом имитационном эксперименте могут быть зарегистрированы как числовые характеристики  $I_j$ , так и вероятности событий с условными номерами 26, 44, 50, 64, 65, 78 и 79, названные ранее гомеостазисом, адаптацией к возникшему в человекомашинной системе возмущению, опасной ситуацией, адаптацией к ней, критической ситуацией, адаптацией к последней и техногенным происшествием одного из типов.

Помимо представленных в табл. 12.3 факторов и предельных значений их индексов  $I_j$ , исходными данными при имитационном моделировании служат варьируемые лингвистические оценки  $K$  качества этих факторов, влияющие на выбор значения каждого индекса, а также заданные генераторам случайных чисел функции  $\pi_x(K)$  принадлежности лингвистических переменных и плотности  $f_x(K)$  вероятности — случайных. Некоторые из этих данных совместно с результатами конкретного машинного эксперимента были приведены выше (см. рис. 12.5), а более полная информация о них систематизирована в табл. 12.6.

Как это подтверждается верхней частью табл. 12.6, исходные данные каждого машинного эксперимента представляют собой следующие характеристики: а) наименования факторов человекомашинной системы — даны сокращенно, в латинской транслитерации; б) их алфавитно-цифровые коды — соответствуют табл. 12.3; в) оценки качества — представлены десятичными дробями, балльные и лингвистические эквиваленты которых приве-

Таблица 12.6. Фрагмент отчета с результатами машинного эксперимента

## Задача № 3. Моделирование процесса появления происшествий в ЧМС

Исходные данные:

KOMFORSR	$C_1 = 0,417$	ZNATECHR	$\psi_2 = 0,750$	OBDEIVOS	$\psi_{13} = 0,334$
KACHINFM	$C_2 = 0,334$	PRIPSIFI	$\psi_3 = 0,334$	TODEIVOS	$\psi_{14} = 0,417$
VOZNVVOZ	$C_3 = 0,584$	VOSDEINF	$\psi_4 = 0,667$	BEZDEIKS	$\psi_{15} = 0,750$
VOZOVVOZ	$C_4 = 0,166$	OPERMOPE	$\psi_5 = 0,334$	KACHKORM	$M_1 = 0,417$
UDPODIVR	$T_1 = 0,250$	ZNPORLNS	$\psi_6 = 0,500$	STUCHRAB	$M_2 = 0,584$
UDTOBREM	$T_2 = 0,584$	SPPROGPO	$\psi_7 = 0,417$	OSNOVFAK	$M_3 = 0,334$
SLALGDEY	$T_3 = 0,334$	TECHDISO	$\psi_8 = 0,334$	ENERGIST	$M_4 = 0,750$
VOZPOLOZ	$T_4 = 0,334$	KACHPRIR	$\psi_9 = 0,584$	BEZOTVEL	$M_5 = 0,750$
VOZPODNO	$T_5 = 0,166$	ZNOFVPRO	$\psi_{10} = 0,334$	DLIDEIOF	$M_6 = 0,417$
NADOTMER	$T_6 = 0,750$	OSVOPVNS	$\psi_{11} = 0,250$	URPOTFAK	$M_7 = 0,334$
NALPRNAV	$\psi_1 = 0,584$	ZNPDVVNS	$\psi_{12} = 0,584$	BEZPRUSB	$M_8 = 0,750$

Результаты моделирования:

№ узлов	Фиксируемые состояния	Мера возможности	Значение индекса				Число исходов
			МОЖ	СО	MIN	MAX	
26	Гомеостазис	0,0540	6	1	5	7	5400
44	Адаптация-1	0,0270	7	1	6	8	2700
50	Оп. ситуация	0,0190	6	2	2	10	1900
64	Адаптация-2	0,0129	8	2	5	13	290
65	Кр. ситуация	0,0061	6	1	5	7	610
78	Адаптация-3	0,0050	5	1	4	6	500
79	Происшествие	0,0011	—	—	—	—	110

дены в табл. 12.2. Например, в левом столбце исходных данных показано, что в эксперименте учитывались в том числе и следующие свойства: KOMFORSR =  $C_1$  (комфортность рабочей среды), UDPODIVR =  $T_1$  (удобства подготовки и выполнения работ) и NALPRNAV =  $\psi_1$  (наличие практических навыков). Эти свойства оценивались как имеющие качества «удовлетворительное», «плохое» и «хорошее», что подтверждено числами 0,417, 0,250 и 0,584, соответствующими модальным значениям их функций принадлежности (см. табл. 12.2).

Приведенные в нижней части табл. 12.6 результаты машинного эксперимента, состоящего из 10 000 имитаций конкретной технологической операции, следует понимать так. В 5400 случаях (см. правую колонку) технологическая операция выполнена без каких-либо отклонений (в соответствующей человекомашинной системе сохранялось

состояние динамического равновесия); тогда как из оставшихся 4600 в 2700 случаях она адаптировалась к возникшим возмущениям, а в 1900 случаях зарегистрированы опасные ситуации. Большая часть этих ситуаций (610) была устранена путем адаптации к ним человеко-машинной системы, однако 500 опасных ситуаций стали критическими, а 110 из них уже привели к появлению техногенных происшествий. Также ясно, что для большинства исходов машинного эксперимента в таблице даны числовые характеристики соответствующих распределений суммарного индекса потенциальной опасности  $I_{\Sigma}$ .

Что касается проверки адекватности разработанной имитационной модели и достоверности сделанных с ее помощью прогнозов вероятности появления происшествий, то отметим следующее. Арифметический порядок ее оценок совпадал с результатами, полученными на основе как моделей другого типа, так и известных статистических данных по аварийности и травматизму. Это же относится и к зависимости вероятности возникновения техногенных происшествий от оценок влияющих на нее свойств человеко-машинной системы.

Пример графиков, интерпретирующих подобную зависимость и построенных по результатам имитационного моделирования происшествий при разных оценках качества одних и тех же свойств конкретных человеко-машинных систем, приведен на рис. 12.6 (применительно к фактору  $Ч_9$  — приему и дешифровке человеком-оператором информации о ходе выполняемой операции). Количественный анализ подобных зависимостей, осуществленный путем определения и сравнения частных производных  $\partial P_j / \partial K_{Ч_9}$ , позволил выявить факторы,

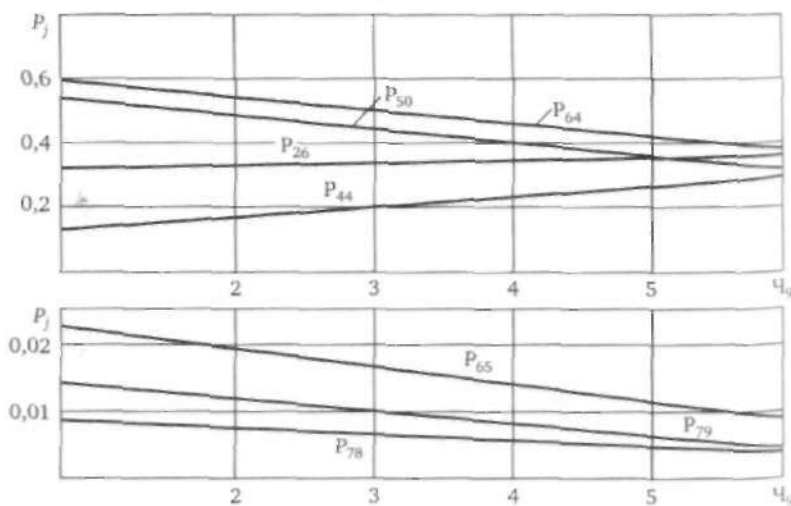


Рис. 12.6. Графики зависимостей  $P_j(Ч_9)$

существенно влияющие на формирование причинной цепи предпосылок к техногенным происшествиям.

В частности, в ходе проведенного исследования установлено, что основными факторами аварийности и травматизма при функционировании большинства человекомашинных систем являются те их свойства, которые определяют профессиональную (психофизиологическую) подготовленность персонала к действиям в нестандартных ситуациях. Другими важными факторами оказались свойства, характеризующие совершенство принятой в этих системах технологии работ, а также качество рабочей среды, безотказность используемого технологического оборудования и надежность технических средств защиты.

Кроме того, удалось количественно оценить вклад различных факторов в образование и развитие цепи предпосылок к техногенным происшествиям. Оказалось, например, что повышение обученности персонала действиям в нестандартных ситуациях на один балл сказывается на снижении вероятности возникновения происшествий в 2—3 раза больше по сравнению с аналогичным изменением выучки к выполнению им обязанностей в штатных условиях. Иначе говоря, анализ реакции имитационной модели на изменение качества профессиональной подготовленности показал сравнительно малую значимость свойств персонала с кодами  $Ч_1$  и  $Ч_2$ .

Такой несколько неожиданный вывод может быть объяснен спецификой подготовки и выполнения технологических операций на энергоемких ОТУ, в частности — совершенной системой обучения и непрерывным контролем действий их персонала. На практике это сопровождается не только высокой теоретической выучкой, но и своевременным устранением тех ошибок персонала, которые могут быть допущены на ранних этапах выполнения операторского алгоритма, т.е. при приеме и декодировании информации о состоянии используемого технологического оборудования.

В то же время установлена высокая значимость для снижения риска техногенных происшествий таких свойств этих систем, как  $Ч_{12}$ — $Ч_{15}$  (умение персонала принимать верные решения и точно действовать в нестандартных ситуациях), а также  $М_8$  и  $Т_6$  — надежность технических и организационных средств, предусмотренных на случай возникновения аварийных ситуаций. Это обусловлено пагубностью ошибок, присущих конечным этапам алгоритмов деятельности человека-оператора: ведь неверная оценка обстановки и неправильно принятые по этой причине решения труднее поддаются контролю со стороны Руководителя работ, а при их устранении обычно ощущается дефицит времени. Вследствие этого подобные ошибки персонала часто влекут за собой опасные последствия.

Заметим, что в алгоритме имитационного моделирования все это учтено следующим образом: для группы несущественных факторов — сравнительно низкими значениями индексов потенциальной опасности свойств  $Ч_1—Ч_3$ , а также тем, что они играют роль инициаторов причинной цепи техногенного происшествя, т.е. необходимых, но не достаточных для его появления условий; тогда как существенные факторы  $Ч_{12}—Ч_{15}$ ,  $M_8$  и  $T_6$  не только проявляются на завершающем этапе ее формирования, но и имеют более высокие значения соответствующих индексов.

В заключение знакомства со способами прогнозирования вероятности техногенных происшествий с помощью диаграмм влияния типа «сеть» отметим особенности формализации и моделирования процесса их появления на основе сетей Петри. Сделаем это кратко, так как процедура их преобразования в аналитические модели и имитационные алгоритмы по существу схожа с тем, что было рассмотрено в данной главе применительно к сетям GERT. И это не случайно, поскольку оба типа этих сетей разрабатывались параллельно и появились практически в одно и то же время — в конце 1980-х гг.

Различия в практическом применении данных причинно-следственных диаграмм касаются главным образом способов вывода математических зависимостей: если в сетях GERT их получают преимущественно с помощью производящих функций моментов, то в сетях Петри — чаще всего путем составления матриц инцидентности с последующим их преобразованием в соответствующие соотношения. Заметим, однако, что исследование обеих этих сетей осуществляют с помощью топологического уравнения С. Мэсона.

Для учета же динамики процессов, моделируемых на основе сетей Петри, используются как мгновенно происходящие события, так и постепенно реализуемые работы-активности. Продолжительность времени осуществления последних указывается специальными таймерами, а вместо степеней свободы узлов сети GERT в сетях Петри вводится кратность дуг, уточняющая условия начала и завершения имитируемых ими преобразований. Качественный и количественный анализ полученных при этом результатов осуществляется по методикам, сходным с рассмотренными в настоящей главе.

Таким образом, можно утверждать, что логико-лингвистическое и имитационное моделирование техногенных чрезвычайных ситуаций могут быть применены для снижения их риска, поскольку позволяют решать ряд практически важных задач. Совместно с прогнозом техногенного риска с помощью количественного анализа стохастической сети GERT их использование станет эффективным способом априорной оценки эффективности мероприятий по поддержанию требуемой безопасности в техносфере и оптимизации выделяемых для этого ресурсов.

## Вопросы и задания для самопроверки

1. Назовите преимущества стохастических сетей GERT в сравнении с другими диаграммами.
2. Какие исходные данные требуются для аналитического моделирования опасных процессов с помощью сетей GERT?
3. Что такое проводимость дуги или ветви и какими параметрами она определяется?
4. Перечислите основные этапы расчета коэффициента пропускания ветви для разомкнутой сети GERT.
5. Какие показатели опасного процесса могут быть найдены в результате аналитического моделирования с помощью сети GERT?
6. На чем основана идея логико-лингвистического моделирования процесса появления происшествий в человекомашинных системах с помощью сети GERT?
7. Какие этапы алгоритма деятельности человека-оператора составляют основу соответствующей семантической модели?
8. Что следует понимать под термином «адаптация» и какие ее виды учитываются в модели, изображенной на рис. 12.2?
9. Приведите доводы, подтверждающие правомерность имитационного подхода к моделированию аварийности и травматизма.
10. Что означают волнистые линии со стрелками, входящими и исходящими из некоторых узлов сети, приведенной на рис. 12.3?
11. Какие события имитируют узлы-истоки, изображенные на рис. 12.3?
12. Почему большинство истоков сети на рис. 12.3 имеют два выхода, тогда как лишь ее узлы 23 и 33, 35 имеют четыре и три выходных дуги соответственно?
13. Перечислите те узлы сети GERT на рис. 12.3, которые играют в ней роль узлов-статистик.
14. Укажите связь между лингвистическими, балльными и дискретными количественными оценками универсальной шкалы качества.
15. В чем состоит сущность механизма имитационного моделирования, проиллюстрированного с помощью рис. 12.3?
16. Охарактеризуйте условия, при которых будет имитироваться появление и обрыв причинной цепи техногенного происшествия в человекомашинной системе.
17. Перечислите состав задач, решаемых методом имитационного моделирования происшествий при функционировании подобных систем.
18. Что служит основными исходными данными и результатами соответствующих машинных экспериментов?
19. Какие аргументы могут быть использованы для подтверждения адекватности рассмотренной в главе имитационной модели?
20. Какие особенности характерны для количественного анализа сетей Петри?

**Ситуационная задача.** Разработайте графическую модель производственного процесса, структурная схема которого изображена на рис. 12.7, имея в виду необходимость проведения входного контроля с отбраковкой одного из десяти комплектующих элементов и такую же численную возможность результата проверки собранных из них изделий. Поясним, что окружности на схеме означают кондиционные элементы и изделия, а круги с пересекающимися линиями — готовую продукцию, не выдержавшую стендовых испытаний и поэтому подлежащую обязательной доработке.



Рис. 12.7. Структура производственного процесса

В качестве графической модели используйте сеть типа GERT, при этом параметрами дуг, выходящих из стохастических на выходе узлов, должны быть вероятность конкретного случайного исхода и время, требуемое для его получения. Значения этих параметров и степени свободы каждого конкретного узла выберите самостоятельно.

## **Общие принципы исследования процесса причинения ущерба**

Изложение материала этой и следующих глав данного раздела представим тремя замечаниями разъяснительного характера:

а) в отличие от прежней априорной оценки вероятности техногенных происшествий в них рассматривается прогнозирование соответствующего ущерба;

б) если до сих пор использовался один и тот же класс графических моделей (причинно-следственные диаграммы), то ниже используется единое деление исследуемого процесса на четыре типовых этапа а также специальные математические модели и компьютерные алгоритмы;

в) так как размеры ущерба зависят от большего числа факторов то достоверность прогноза этого параметра техногенного риска ниже чем предыдущего.

Предметом же настоящей главы будет рассмотрение содержания ущерба и наиболее общих принципов его прогнозирования.



### 13.1. Сущность и краткая характеристика процессов причинения и оценки ущерба от происшествий

Статистика техногенных аварий, катастроф и несчастных случаев свидетельствует, что техногенный ущерб людским, материальным и природным ресурсам чаще всего вызван пожарами и транспортными происшествиями. Его источник — неконтролируемое высвобождение энергозапаса, накопленного движущимися телами, сосудами высокого давления, взрывчатыми веществами, ядовитыми техническими жидкостями и другими АХОВ. А вот основными поражающими факторами чаще всего служат:

а) термический (тепловое излучение и токсичные продукты горения) — примерно 50% от общего числа проявления соответствующих источников;

б) бризантно-фугасный (дробящий, деформирующий и метательный эффект) — до 30%;

в) агрессивные или токсичные свойства вредных веществ — около 10%.

Изучение известных статистических данных свидетельствует также о многообразии обстоятельств развития и проявления техногенных происшествий, т.е. возникновения и разрушительного воздействия на различные объекты перечисленных выше и иных опасных факторов. Вот почему детальное рассмотрение исследуемого здесь процесса причинения техногенного ущерба удобно провести, поделив его на следующие четыре этапа:

1) высвобождение (расконсервация) накопленных в ОТУ запасов вредного вещества или энергии вследствие разгерметизации соответствующей емкости либо генератора;

2) неконтролируемое распространение (трансляция) их потоков после истечения подобного энергозапаса в новую для него среду и перемешивания с ней;

3) физико-химическое превращение (трансформация) АХОВ с неизбежным энергообменом и переходом в новое агрегатное или фазовое состояние;

4) разрушительное воздействие (адсорбция) на соседние объекты потоков аварийно высвободившегося энергозапаса и продуктов его трансформации.

Последовательно охарактеризуем каждый этап, обращая внимание лишь на особенности, имеющие существенное значение для прогнозирования величины техногенного ущерба. Преимущественное внимание при этом уделим поведению АХОВ, поскольку потоки энергии (например, электромагнитной или ионизирующих излучений) высво-

бождаются и распространяются практически мгновенно. Кроме того, они практически не меняют свои параметры в пределах учитываемых здесь сравнительно малых времени и пространства.

Характеристику *первого* этапа, т.е. расконсервации АХОВ и энергии, накопленной, допустим, движущимися телами разной величины, удобно провести, отвечая на следующие три вопроса: а) что высвобождается? б) откуда или из чего оно истекает? в) каким образом это возникло и происходит? При этом главное внимание при ответе на каждый из них должно быть уделено уяснению динамики рассматриваемого процесса и изменения физико-химических свойств подобного энергозапаса, а также априорной оценке его параметров.

При этом *рекомендуется* использовать следующие основные варианты ответа на эти вопросы: а) вредное вещество (газообразное, жидкое, газокапельное, порошкообразное, меняющее или сохраняющее агрегатное состояние в процессе высвобождения) либо энергия — в форме движущихся тел или потока невидимых частиц-волн; б) из генератора (компрессора, насоса, источника энергии) или аккумулятора (емкости) — вследствие разгерметизации или разрушения; в) практически мгновенно (залповый выброс), непрерывно — с постоянным или переменным расходом либо эпизодически — регулярно или случайным образом. Итогом изучения данной стадии следует считать прогноз таких параметров, как количество внезапно высвободившегося АХОВ или интенсивность и продолжительность его постепенного истечения, плотность потока микрочастиц или количество движения макротел, напряженность электромагнитных полей, интенсивность теплового или ионизирующего излучений.

Особенности исследования *второго* этапа процесса причинения техногенного ущерба обычно обусловлены как только что перечисленными факторами, так и спецификой пространства, заполняемого АХОВ или находящегося между источником энергии и объектами, подверженными воздействию. Подобное пространство может быть трехмерным (атмосфера, водоем, почва) и характеризоваться фактически бесконечными размерами либо ограничиваться другой средой, способной поглощать или отражать высвободившиеся потоки, а его заполнение — быть однородным или нет, неподвижной или подвижной средой.

С учетом данного обстоятельства возможны различные сочетания тех факторов, которые существенны для энерго-, массо-, потокообразования, что проявляется в различных сценариях распространения продуктов выброса — от растекания жидких веществ по твердой поверхности до заполнения всего пространства смесью аэрозоля, газа и жидкости. Учитывая практическую невозможность детального рассмотрения всех реально возможных сценариев, основное внима-

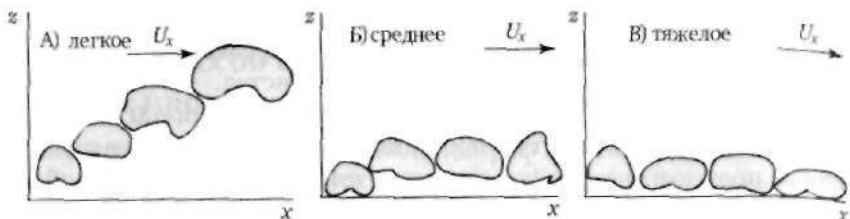


Рис. 13.1. Закономерности распространения веществ в атмосфере

ние в последующем уделим лишь распространению вредных веществ в атмосфере с учетом естественно протекающих там процессов.

При изучении условий подобного распространения (рис. 13.1) будем исходить из базовых закономерностей поведения облака (зальповый выброс) или шлейфа (непрерывное истечение) вредного вещества: а) легкие его фракции поднимаются с образованием расширяющегося облака; б) нейтральные фракции касаются земли или распространяются параллельно ей; в) тяжелые фракции стелятся над подстилающей (атмосферу) поверхностью и постепенно приближаются к ней. При этом влияние архимедовых и гравитационных сил, подвижности атмосферы (в горизонтальном и вертикальном направлениях) и шероховатости рельефа местности обычно проявляются в дрейфе и размывании этих газообразований за счет трения о подстилающую поверхность и турбулентного рассеяния в результате атмосферной диффузии.

Если трение о подстилающую поверхность зависит от зданий, деревьев и других «шероховатостей» в районе выброса вредного вещества, то его турбулентный обмен с атмосферой определяется уже циркулирующими в ней потоками. Учет подобного влияния осуществляется введением шести классов вертикальной устойчивости или стабильности атмосферы: А — сильно неустойчивая, с преобладанием конвекции; В — умеренно неустойчивая; С — слабо неустойчивая; D — нейтральная стратификация (изотермия); E — слабо устойчивая, с инверсией; F — умеренно устойчивая.

В настоящее время известны несколько подходов к определению класса вертикальной устойчивости атмосферы [10]. При этом наиболее часто применяются те критерии его оценки, которые приведены в табл. 13.1.

Найденный подобным способом класс устойчивости затем используется для определения эмпирических коэффициентов и функциональных зависимостей, характеризующих распространение АХОВ в атмосфере с учетом конкретного сценария и объема их выброса. Конечной же целью изучения данного этапа служит априорная количественная оценка пространственно-временного распределения концентраций

Таблица 13.1. Классы устойчивости атмосферы по Ф. Пескуиллу

Ветер на высоте 10 м, м/с	День, инсоляция			Ночь, облачность	
	интенсивная	умеренная	слабая	тонкая (> 5/8)	отсутствует (< 3/8)
$U \leq 2$	A	A, B	B	—	—
$2 < U \leq 3$	A, B	B	C	E	F
$3 < U \leq 5$	B	B, C	C	D	E
$5 < U \leq 6$	C	C, D	D	D	D
$U > 6$	C	D	D	D	D

Примечание. При полной облачности днем и ночью подразумевается один и тот же класс D.

вредных веществ или плотности потока аварийно высвободившейся энергии.

Что касается *третьего* этапа, т.е. возможной трансформации истекающих из ОТУ потоков энергии и вредного вещества, то характер ее наступления и соответствующая вероятность зависят от большого числа указанных выше и иных факторов. Наиболее простой является ситуация, при которой физико-химические свойства новой среды и продуктов выброса характеризуются взаимной инертностью. В противном случае в заполненных ими объемах пространства не исключены фазовые переходы типа «кипение — испарение» или превращения в форме горения либо взрыва, сопровождающиеся дополнительным энергообменом.

Особенно это характерно для аварийных выбросов горючих веществ, приводящих к образованию топливоздушных смесей (ТВС). Например, залповый выброс в атмосферу значительного количества сжиженного углеводородного газа сопровождается его практически мгновенным испарением с образованием смеси, способной после контакта с открытым огнем взорваться или интенсивно сгореть за сравнительно небольшое время.

Принципиальное отличие между взрывом (детонацией) и горением (дефлаграцией) состоит в заметно большей (до двух порядков) скорости распространения практически плоского фронта взрыва в сравнении с поверхностью горения, «сморщенной» турбулентностью, и значительной (примерно 2, а не 0,1 МПа) разнице градиентов давления в волнах сжатия, генерируемых этими формами физико-химического преобразования. Последняя особенность объясняет колоссальный по разрушительности эффект взрыва ТВС.

Целями исследования данного этапа служат прогнозирование зон концентрации аварийно высвободившегося токсичного вещества, а также наиболее вероятной формы (взрыв, воспламенение, испарение и рассеяние в новой среде) трансформации такого же АХОВ

и априорная оценка параметров образовавшихся при этом (вторичных) поражающих факторов. Естественно, что для априорной оценки размеров подобных зон, концентрации имеющегося в них вредного вещества, вероятности взрыва или пожара ТВС и вызванных этим разрушительных эффектов используются и результаты, полученные на двух предыдущих этапах.

Четвертым этапом исследования процесса причинения техногенного ущерба является разрушительное воздействие первичных и вторичных поражающих факторов выброса АХОВ на незащищенные объекты из состава людских, материальных и природных ресурсов, а его целью — оценка соответствующих параметров. При их прогнозе в настоящем учебнике учитывается следующее:

а) для опасных факторов — перепад давления на фронте воздушной ударной волны и кинетическая энергия движущихся тел, концентрация токсичных веществ и интенсивность вредных излучений;

б) для повреждаемых объектов — их стойкость и живучесть с учетом мощности и длительности подобного опасного воздействия.

Сам же техногенный ущерб в последующем делится на два вида:

1) *прямой*, или непосредственный (обусловлен утратой целостности либо ухудшением иных полезных свойств конкретных объектов);

2) *косвенный*, вызванный нарушениями связей между поврежденными и другими объектами техносферы или природной среды.

Более детальная характеристика первого компонента техногенного ущерба представлена в табл. 13.2.

Сразу поясним, что при построении правой части приведенной здесь таблицы руководствовались следующей логикой: по мере движения по ее столбцам слева направо интенсивность или доза вредного воздействия опасных факторов понижается, тогда как отдаленность проявления их разрушительных последствий на рассматриваемые объекты растет. Что же касается градации соответствующих свойств, то она — двухступенчатая: для интенсивности — «большая» и «малая», а отдаленности наступления вредного эффекта — «немедленно» и «впоследствии».

В заключение параграфа отметим, что, несмотря на краткость характеристики выбранных четырех этапов причинения техногенного ущерба и определенную условность только что предложенной классификации различных форм его проявления, даже приведенные здесь сведения подтверждают случайность и многообразие сценариев возможного развития техногенных происшествий. Эти и другие особенности свидетельствуют не только о трудоемкости прогнозирования всех параметров рассматриваемого здесь процесса, но и о необходимости привлечения для этого самых разнообразных моделей и методов. Однако до их детального рассмотрения целесообразно опреде-

Таблица 13.2. Формы и особенности проявления непосредственного ущерба

Ресурсы и объекты причинения ущерба	Формы причинения в зависимости от 1) интенсивности вредного воздействия и 2) отдаленности проявления последствий			
	1.1. Большая	2.1. Немедленно	1.2. Малая	2.2. Впоследствии
Материальные: производственные, бытовые и культурные здания, помещения и оборудование, готовая продукция	Уничтожение в результате катастрофы или аварии	Вывод из строя по причине отказов или разрушения	Снижение эффективности из-за нерасчетных режимов работы	Повышенный износ либо интенсивное старение
Людские: оперативный и обслуживающий персонал, а также люди, проживающие вблизи или случайно оказавшиеся на месте аварии	Гибель и увечья по причине несчастных случаев	Снижение трудоспособности из-за травмирования	Ухудшение здоровья в результате профессиональных заболеваний	Преждевременная смертность и плохая наследственность
Природные: фауна и флора, другие органические ресурсы и минеральные полезные ископаемые	Вымирание биособей и уничтожение ресурсов из-за аварий	Снижение биоразнообразия и жизнестойкости видов	Нарушение естественных биогеохимических циклов вещества	Мутагенные изменения и (или) истощение запасов

литься с основными подходами к прогнозу как математического ожидания ущерба, т.е. интегрального показателя техногенного риска, так и его частных параметров.

### 13.2. Общие принципы прогнозирования и оценивания параметров нежелательного проявления источника риска

Как было показано выше, важной особенностью априорной количественной оценки ущерба от аварийных и непрерывных вредных выбросов ОТУ является необходимость учета довольно большого числа факторов. Одна их часть должна отражать специфику источника техногенных угроз, а вторая — свойства повреждаемых ими объектов, определяющие их уязвимость по отношению к конкретным опасным и вредным факторам. При этом подавляющее число соответствующих параметров каждой такой группы имеет стохастическую природу.

Проиллюстрируем все это подробнее и двумя способами: вначале — с помощью рис. 13.2, представляющего уже известные этапы причинения ущерба от происшествий (второй объединен с третьим) и их основные параметры; затем — на примере только заключитель-



Рис. 13.2. Этапы прогнозирования и параметры ущерба

ной стадии изображенного процесса, т.е. рассматривая лишь разрушительное воздействие опасных и вредных факторов на не защищенные от них объекты.

В верхней части рис. 13.2 изображены этапы причинения возможного ущерба, в центральной — фрагмент дерева событий, учитывающий лишь наиболее характерные исходы этого процесса, в нижней — расчетные соотношения для его разных этапов. Фрагментарность имеющегося дерева отражена дугами со стрелками, не упирающимися в какие-либо события, и штриховым обозначением его ветви, соединяющей исходы  $1_i$  и  $3_{k+2}$ . Последняя учитывает возможность объединения тех двух этапов причинения ущерба, которые будут связаны, например, с распространением и губительным поглощением электроэнергии телом человека, оказавшегося «включенным» в электрическую цепь.

Верхняя строка таблицы под деревом событий-исходов содержит формулы для прогноза математического ожидания следующих случайных величин:  $M(K)$  — количества аварийно высвободившегося из ОТУ энергозапаса,  $M(\Pi)$  — площади с появившимися там поражающими факторами и  $M(Y)$  — ущерба от их воздействия на различные объекты. В нижней строке даны критерии оценки правильности учитываемых при этом условных вероятностей: их сумма на каждом уровне дерева должна быть равной точно  $Q$ , а не единице, как это имело место выше (см. формулу (10.2) — для безусловных вероятностей дерева событий), где соответствующие исходы представляли полную группу несовместных событий.

Нетрудно догадаться, что прогнозирование техногенного ущерба с помощью диаграммы типа «дерево событий» требует знания всех

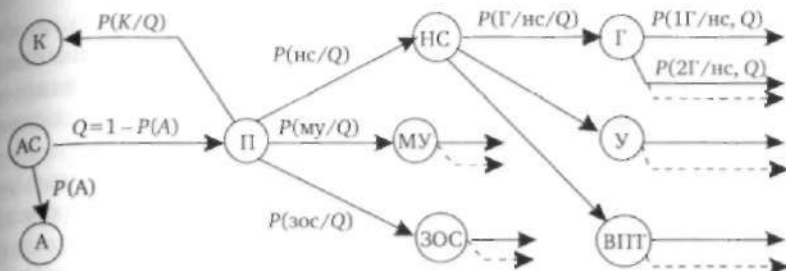


Рис. 13.3. Граф проявления источника риска ОПО

параметров рис. 13.2. Естественно, что для получения подобной информации необходимо иметь комплекс специфичных и довольно сложных моделей. Продemonстрируем их сложность на еще одном иллюстративном примере — ориентированном графе, представленном на рис. 13.3.

Показанный на нем ветвящийся процесс начинается с возникновения аварийной ситуации (АС), которая с соответствующими условными вероятностями  $Q(*)$  или  $P(*/*/Q)$  может завершаться либо адаптацией (А) к ней какой-либо человекомашиной системы, либо происшествием (П) конкретного типа — катастрофой (К), несчастным случаем (НС), аварией с материальным ущербом (МУ) или с загрязнением окружающей среды (ЗОС). При этом некоторые из исходов происшествия, например НС, способны приводить к гибели (Г/НС, Q), увечьям (У/НС, Q) или временной потере трудоспособности персонала (ВПТ/НС, Q), тогда как смертельный несчастный случай может быть единичным (1Г/НС, Q) или групповым ( $\geq 2Г/НС, Q$ ). Признаем также, что подобные последствия возможны для других форм проявления техногенного происшествия, что показано стрелками, не имеющими пояснений.

В рассматриваемых условиях величина среднего ущерба  $Y_k$  от одного происшествия конкретного типа будет связана с ущербами  $Y_j$  его разных исходов следующим образом:

$$Y_k = \sum_j P(*)P(Y_j/*)Y_j, \quad (13.1)$$

а математическое ожидание  $M(Y)$  величины техногенного ущерба, определяемой с учетом всех возможных сочетаний различных последствий, может рассчитываться по формуле

$$M(Y) = \sum_{k=1}^m C_m^k P^k (1 - P_k)^{m-k} \sum_j P_j P(Y_j/*) Y_j, \quad (13.2)$$

где  $m, k$  — соответственно количество ОТУ, участвующих в проведении технологических процессов на ОПО, и та их часть, где имели



место техногенные происшествия;  $C_m^k$  — число сочетаний из  $m$  по  $k$  рассматриваемых устройств;  $P_j$ ,  $P(Y_j^*/*)$  и  $Y_j$  — вероятности возникновения происшествия конкретного типа и причинения им техногенного ущерба в случае появления, а также размеры ущерба, соответствующего этому происшествию.

Изучение предложенных формул подтверждает принципиальную сложность и трудоемкость априорной количественной оценки последствий проявления даже отдельно взятого техногенного происшествия. Это обусловлено тем, что одни и те же объекты из состава людских, материальных и природных ресурсов могут быть подвержены воздействию нескольких поражающих факторов в различных сочетаниях. Учесть же все это заблаговременно практически невозможно, так как каждый фактор имеет случайную природу, а каждая потенциальная жертва — сугубо индивидуальные параметры.

Следовательно, прогнозирование техногенного ущерба по формулам (13.1) и (13.2) требует принятия ряда упрощающих допущений. Они должны быть направлены на переход от условных вероятностей к безусловным либо на приравнивание первых нулю или единице, а вторых — между собой, а также на отказ от оперирования реальным значением ущерба от конкретного техногенного происшествия в пользу замены его некоторой усредненной величиной. С учетом этих допущений могут быть получены математические соотношения хотя и менее точные, но все же более пригодные для практической оценки техногенного риска.

При выводе подобных соотношений должна быть учтена необходимость прогнозирования техногенного ущерба не только от аварийных, но также от непрерывных и систематических вредных выбросов энергозапаса ОТУ, появление которых возможно за некоторый период  $t$  его эксплуатации. Причем делать это желательно двумя способами, отличающимися разными подходами к априорной оценке интересующего нас случайного ущерба.

В первом случае целесообразно исходить из предположения об известности как размеров среднего социально-экономического ущерба от каждого подобного выброса, так и вероятности его возникновения на ОПО. Это позволит оценить математическое ожидание обусловленного им ущерба людским, материальным и природным ресурсам с позиции как бы источника соответствующих угроз — по следующей довольно общей формуле:

$$R_{\tau} = M_{\tau}(Y) = \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^{k_a} Q_{ab}^I Y_{ab}^I + \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^{k_a} Q_{ab}^{II} Y_{ab}^{II} + \sum_{v=1}^n Q_v Y_v, \quad (13.3)$$

где  $a = 1, \dots, m$  — типы возможных на ОПО техногенных происшествий: авария ( $a = 1$ ), несчастный случай ( $a = 2$ ), катастрофа ( $a = 3$ )

и форм причинения ими прямого (I) и косвенного (II) ущерба людским, материальным и природным ресурсам;  $b = 1, \dots, k_a$  — предполагаемые сценарии (наиболее вероятные варианты) проявления конкретного происшествия;  $Q_{ab}^I, Q_{ab}^{II}$  и  $Y_{ab}^I, Y_{ab}^{II}$  — вероятности появления каждого его типа за время  $t$  и размеры соответствующего прямого (I) и косвенного (II) ущерба;  $v = 1, \dots, n$  — непрерывно или систематически выбрасываемые виды энергии (шум, вибрация, электромагнитные излучения и т.д.) и вредного вещества (дым, пыль, шлак и т.д.);  $Q_v, Y_v$  — вероятности появления каждого типа подобных выбросов и размеры вызванного ими ущерба.

В основе *второго* способа априорной оценки техногенного ущерба уже лежит оперирование зонами (площадями или объемами пространства), в пределах которых могут оказаться те объекты из состава людских, материальных и природных ресурсов, которые не защищены от разрушительного воздействия энергетических и вредных материальных выбросов конкретного ОПО. Данный подход позволяет оценивать ожидаемый средний ущерб уже с точки зрения как бы потенциальных жертв — с помощью следующей формулы:

$$R_t = M_t(Y) = \sum_{l=1}^3 Q_l^I \Pi_l^Q F_l S_l + \sum_{l=1}^3 \Pi_l F_l S_l + \sum_{v=1}^n Q_v Y_v + \sum_{l=1}^3 Q_l^{II} Y_l^{II}, \quad (13.4)$$

где  $Q_l^I$  — вероятности причинения людским ( $l=1$ ), материальным ( $l=2$ ) и природным ( $l=3$ ) ресурсам конкретного прямого (I) ущерба аварийными выбросами ОПО за время  $t$  его функционирования;  $\Pi_l^Q, \Pi_l$  — соответственно площади/объемы зон вероятного и достоверного поражения соответствующих объектов аварийными и систематическими выбросами вредного вещества и энергии;  $F_l, S_l$  — средняя плотность и стоимость каждой единицы ресурса, оказавшегося в зонах вероятного и достоверного причинения ему упомянутого выше ущерба;  $Q_l^{II}, Y_l^{II}$  — вероятность возникновения конкретного происшествия за время  $t$  и средние размеры ожидаемого от него косвенного (II) ущерба.

Анализ приведенных математических соотношений свидетельствует о том, что прогнозирование их параметров потребует разработки комплекса конкретных моделей, которые с определенной условностью могут быть разбиты на следующие три класса.

1. Уже известные логико-вероятностные модели, основанные на диаграммах причинно-следственных связей типа «дерево», «граф» и «сеть» стохастической структуры.

2. Аналитические модели:

а) параметрические формулы для перепада давлений, скоростей, температур, концентраций и иных потенциалов;

б) интегральные модели сохранения массы или энергии, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями;

в) модели, оперирующие текущими параметрами энергообмена и реализуемые системами дифференциальных уравнений в частных производных.

3. Методы статистического и численного моделирования, основанные на математических соотношениях со случайными параметрами и учитывающие практически все наиболее существенные факторы человеко-машинной системы.

С точки зрения предпочтительности наибольшую практическую ценность для прогноза параметров техногенного ущерба представляют модели таких объектов или процессов:

- а) источник выброса энергии или АХОВ и несущая их среда;
- б) истечение газообразных и жидких вредных веществ;
- в) распространение их потоков в атмосфере или растекание по твердой поверхности;
- г) вскипание выброшенных в атмосферу сжиженных газов и перегретых жидкостей;
- д) дефлаграция или детонация формирующихся при этом ТВС;
- е) образование вторичных поражающих факторов, сопутствующих подобным физико-химическим превращениям;
- ж) сами эти и иные опасные факторы, а также их реципиенты;
- з) повреждение, разрушение или уничтожение различных объектов поражающими факторами.

Для исследуемых четырех этапов причинения техногенного ущерба наиболее подходят не физические, а идеальные модели (см. параграф 5.2), начиная от мысленных сценариев развития аварии и зависимостей «доза — эффект» и завершая знаковыми (математическими и алгоритмическими) моделями. При этом для априорной количественной оценки параметров техногенного ущерба целесообразно применять хорошо зарекомендовавшие себя методы теории вероятностей, а для апостериорной — математической статистики.

В заключение данного параграфа обоснуем целесообразность интервального оценивания техногенного риска в интересах соответствующего менеджмента. Казалось бы, наилучшим решением о приемлемости среднего техногенного ущерба  $M_i(Y)$  следует считать «накрытие» (с выбранной доверительной вероятностью  $\gamma$ ) случайной интервальной оценкой  $[R_i^H, R_i^B]$  его желаемой величины  $R_i^* = M_i^*(Y)$ , найденной по формулам (13.3) или (13.4) (индексы Н, В здесь означают нижнее и верхнее значения этого интегрального показателя).

Однако вследствие исключительно большого разброса прогнозных значений техногенного ущерба, достигающего сегодня четырех арифметических порядков, обоснованность только что упомянутого подхода вряд ли можно признать удовлетворительной. Дело в том, что

стандартный доверительный интервал  $[R_{\tau}^H, R_{\tau}^B]_{\gamma=0,9}$  будет оцениваться этим же числом арифметических порядков, а потому он и «накроет» любое значение  $R_{\tau}^*$  из столь широкого диапазона. Это совершенно недопустимо из-за низкой надежности тех решений о приемлемости техногенного риска, которые могут быть приняты при осуществлении соответствующего менеджмента на основе неточных оценок  $M_{\tau}(Y)$ .

Учитывая данное обстоятельство, при оценке приемлемости техногенного риска в последующем (см. разд. III настоящего учебника) будем оперировать не нормируемыми величинами ожидаемого среднего ущерба  $M_{\tau}(Y)$  и их интервальными оценками, а соответствующими значениями его частных параметров. Для этого лучше всего подходят имеющиеся в формулах (13.3) и (13.4) вероятности  $Q_{ab}^1$  — появления на ОТУ наиболее крупной или часто встречающейся аварии конкретного типа и  $Q_i^1$  — причинения ею конкретного прямого ущерба (гибели человека в несчастном случае, пролива определенного объема жидкого АХОВ и т.п.).

Предпочтительность предложенного здесь подхода к оцениванию степени приемлемости техногенного ущерба для администрации ОПО обусловлена тем, что стандартные доверительные интервалы  $[Q_{\tau}^H, Q_{\tau}^B]$  для этих вероятностей будут в сотни раз уже, чем интервалы для ущерба  $[R_{\tau}^H, R_{\tau}^B]$ . Более того, процедура обоснования допустимых значений вероятности  $Q^*(\tau)$  появления конкретных техногенных происшествий является более строгой, а приемлемые значения этой меры возможности их возникновения лучше воспринимаются людьми.

Еще одним способом уменьшения дисперсии и сужения доверительного интервала  $[Q_{\tau}^H, Q_{\tau}^B]_{\gamma=0,9}$  можно считать применение заранее строго оговоренных методик и предписанного алгоритма их практического применения. Подобный подход уже используется при нормировании приемлемого техногенного риска российских АЭС: например, вероятность тяжелых запроектных аварий не должна превышать там  $10^{-6}$ — $10^{-5}$  в год. А оцениваться она должна с соблюдением так называемых трех единств, т.е. по одной методике, одной и той же рабочей группой и при одних и тех же источниках исходных данных.

Кроме того, в ряде отраслей отечественной промышленности приняты попытки внедрить количественные критерии приемлемости техногенного риска. А делается это путем нормирования взрыво- и пожаробезопасности используемых ОТУ. Например, допустимый социальный риск не должен превышать  $10^{-7}$  год<sup>-1</sup>, а такой же индивидуальный —  $10^{-6}$ . К сожалению, приведенные здесь для примера критерии не уточняют ни временных рамок, ни типа аварии, что затрудняет их практическое использование.

Особо подчеркнем, что оценивание техногенного риска по вероятности  $Q^*(\tau)$  появления заранее оговоренных происшествий, а не по ожидаемому от них ущербу  $M_{\tau}(Y)$  не исключает необходимости в прогнозиро-

вании величины последнего. Напротив, использование формул (13.3) и (13.4) позволит оптимизировать решения, принимаемые администрацией конкретных ОПО, несмотря на малую достоверность полученных по ним абсолютных оценок ущерба. Ведь для этого придется оперировать не величиной  $M_t(Y)$ , имеющей большую дисперсию, а относительными изменениями  $\Delta M_t(Y)$  этой оценки, которые чувствительны к улучшению качества конкретных компонентов ЧМС на значения  $\Delta Ч$ ,  $\Delta М$ ,  $\Delta С$  или  $\Delta Т$ , что позволяет выбрать наиболее эффективные организационно-технические мероприятия по снижению риска.

Общая схема соответствующей расчетно-оптимизационной процедуры в данном случае будет касаться либо снижения вероятности происшествия

$$\Delta Ч, \Delta М, \Delta С, \Delta Т \rightarrow \Delta Q_t^j(\Delta Ч, \Delta М, \Delta С, \Delta Т),$$

либо уменьшения ожидаемого от него ущерба

$$\Delta Q_t^j(\Delta Ч, \Delta М, \Delta С, \Delta Т) \rightarrow \Delta M_t(Y)(\Delta Q_{ab}^j \text{ и/или } \Delta Q_j^j).$$

При этом самыми предпочтительными станут те из предлагаемых мероприятий, которые соответствуют: а) наибольшему (при выделенных затратах  $S^*$ ) снижению либо вероятностей  $Q_{ab}^j$  и  $Q_j^j$  конкретных происшествий, либо ожидаемого от них ущерба  $M_t(Y)$ ; б) наименьшим затратам  $S(\Delta Ч, \Delta М, \Delta С, \Delta Т)$  на внедрение подобных мероприятий с целью получения нужного эффекта (снижения величины  $M_t(Y)$  до приемлемого уровня).

### 13.3. Обобщенная методика прогнозирования ожидаемого на объекте повышенной опасности среднего ущерба

Принятая ранее энергоэнтропийная концепция и универсальная декомпозиция процесса причинения техногенного ущерба вместе с принципами его прогнозирования позволяют сформулировать заявленную здесь методику. Естественно, что она должна основываться на закономерностях проявления источников техногенного риска, обусловленного случайными и непрерывными выбросами накопленного в ОТУ энергозапаса. При этом величину ущерба от него следует увязывать как с объемами и токсичностью таких выбросов, так и с числом и степенью уязвимости объектов, подверженных их воздействию.

Следовательно, можно утверждать о целесообразности включения в методику следующих основных шагов:

а) идентификация объемов энергии и АХОВ, способных к нежелательному высвобождению;

б) прогнозирование предпосылок и сценариев подобных выбросов;

в) оценка частоты и объема возможных при этом утечек энергозапаса;

г) определение зон их разрушительного воздействия и их насыщенности незащищенными объектами;

д) сопоставление их стойкости с поражающими факторами указанных выбросов;

е) прогноз их разрушительных эффектов;

ж) оценка прямого и косвенного техногенного ущерба.

Общая последовательность априорной количественной оценки величины и степени приемлемости техногенного риска, основанная на только что изложенной концепции, показана на рис. 13.4 в виде алгоритмической модели соответствующей процедуры, каждая итерация которой включает не более 25 шагов. Последовательно и кратко охарактеризуем учтенные там шаги-этапы, двигаясь сверху вниз и уделяя особое внимание тем моделям и методам, которые наиболее предпочтительны для их практического осуществления.

1. При уточнении предназначения и сферы применимости результатов оценки риска эксплуатации ОПО следует исходить из того, что ее целью служит принятие решения о принадлежности риска коридору допустимых значений либо выявление самых эффективных стратегий его снижения путем исключения тех факторов ОТУ, вклад которых оценивается как наиболее значимый.

Поэтому область *предпочтительного* применения данной методики должны быть ОПО, декомпозируемые на ОТУ, каждое из которых можно интерпретировать функционированием соответствующей ЧМС. Приступать к оцениванию приемлемости техногенного риска следует на стадии рабочего проектирования ОПО, когда известны параметры основных компонентов ОТУ, а также особенности их взаимодействия между собой и с окружением.

2. Интегральным показателем опасности ОПО должен служить риск  $R_c$  происшествий, интерпретируемый как ожидаемый за время  $\tau$  средний ущерб и рассчитываемый по формулам (13.3) или (13.4), а критерием его приемлемости — покрытие случайным доверительным интервалом оценок входящих в них вероятностей социально-приемлемой величины  $Q^*(\tau)$ . Если в составе объекта имеются мощные источники непрерывных вредных материальных и (или) энергетических выбросов, то при принятии решения о приемлемости риска следует учитывать и вызванный ими ущерб объектам окружающей среды, что показано на рис. 13.4 блоком 6.

Основным методом прогнозирования техногенного ущерба должно быть моделирование с опорой на достоверные статистические данные по аналогам, а исходными данными, требуемыми для априорной оценки параметров  $R_c$ , — структурные схемы надежности и интенсив-

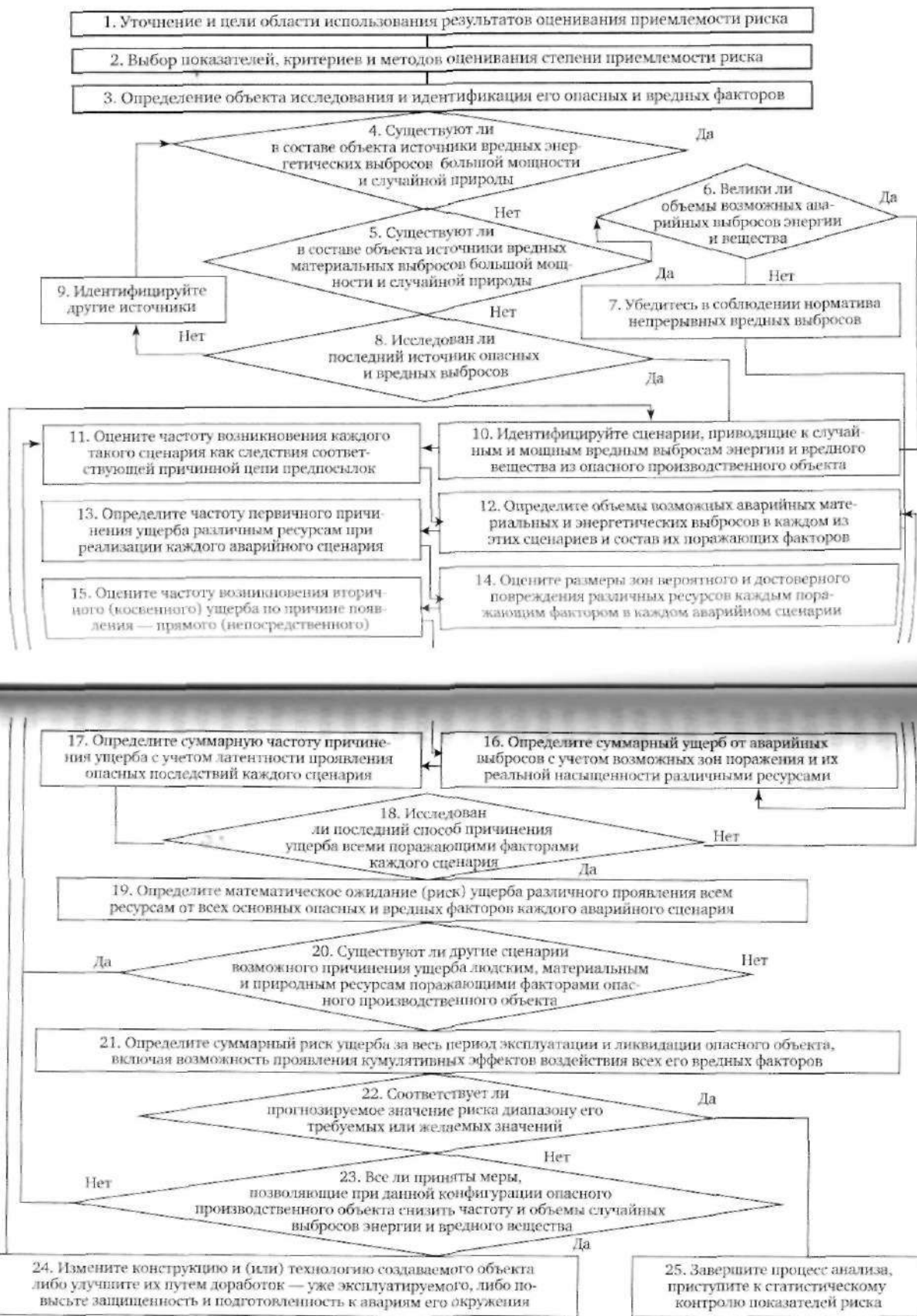


рис. 13.4. Блок-схема идентификации и оценивания источников риска ОПО

ности отказов технологического оборудования, вероятности ошибок эксплуатирующего персонала и нерасчетных для них внешних воздействий, а также продолжительность, частота и токсичность непрерывных вредных выбросов, гидрометеорологические условия, состав, средняя плотность, стоимость и защищенность ресурсов в районе дислокации ОПО. При выборе конкретных методов следует руководствоваться нормативными документами и использовать предложенные выше или иные апробированные модели возникновения, распространения, трансформации и разрушительного воздействия вредных энергетических и материальных выбросов на объекты, оказавшиеся в опасной зоне.

3. Объектами прогноза и оценки приемлемости техногенного риска должны быть все предприятия и ОТУ, содержащие большие объемы обращающегося там энергозапаса, а непосредственными источниками опасности — генераторы или аккумуляторы энергии и вредных веществ (насосы и компрессоры, резервуары и трубопроводы со сжатыми газами, взрывопожароопасными, токсичными и иными АХОВ), а также движущиеся машины, механизмы и их отдельные компоненты. В аварийных ситуациях, вызванных разрушительным высвобождением большого количества накопленного энергозапаса, требуется учитывать также дополнительные поражающие факторы, обусловленные эффектом домино.

При определении приоритета в оценивании степени приемлемости параметров риска аварийных и непрерывных вредных выбросов ОПО целесообразно исходить из того, что вероятность появления аварийных ситуаций и размеры соответствующего ущерба растут по мере старения технологического оборудования конкретных ОТУ и увеличения плотности ресурсов, постоянно или временно расположенных вблизи от них.

4—9. При идентификации источников возможных аварийных и иных вредных выбросов ОПО нужно руководствоваться величиной накопленной в их ОТУ энергии или предельно допустимыми (по Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (в ред. от 4 марта 2013 г.) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов») запасами вредных веществ, а также размерами образуемых при их утечке достоверных  $P_1$  и вероятных  $P_1^Q$  зон поражения. Если все эти параметры незначительны, то соответствующие ОТУ могут считаться безопасными и исключаться из последующего исследования на предмет оценивания техногенного риска.

Для принятия решения о необходимости учета источников непрерывных вредных выбросов ОПО следует руководствоваться нормативами предельно допустимых выбросов в атмосферный воздух, установленными с учетом их объема, токсичности и особенностей окружающей природной среды.



10. Выявление сценариев наиболее вероятного возникновения и развития техногенных происшествий на ОПО, т.е. совокупности предпосылок к нежелательному высвобождению накопленного там энергозапаса, а также способов истечения, распространения, трансформации и адсорбции соответствующих потоков, должно проводиться в два этапа. Вначале — с использованием эмпирических данных по аналогам и результатов качественного анализа риска (см. гл. 7) с помощью методик «Что будет, если...?», «Исследование опасности и работоспособности», «Анализ видов, последствий и критичности отказов»; а затем — моделированием на основе причинно-следственных диаграмм типа «дерево», «граф» или «сеть».

11. Оценка частоты проявления конкретного сценария аварийного выброса энергозапаса целесообразно проводить путем статистической обработки данных об аналогичных техногенных происшествиях или количественного анализа моделей, построенных на предыдущем шаге. Наиболее подходящими для модельной оценки вероятности  $Q_{ab}$  аварийных выбросов будут математические соотношения между ней и мерами возможности исходных предпосылок дерева происшествия, тогда как относительные частоты (условные вероятности  $Q_i$  различных исходов) разрушительного воздействия соответствующих потоков на людские, материальные и природные ресурсы следует определять, руководствуясь подобными методами количественного анализа дерева событий.

При отсутствии достоверной информации о вероятностях предпосылок дерева происшествия оценку меры возможности появления его головного события целесообразно осуществлять с помощью имитационного моделирования процесса возникновения техногенных происшествий в ЧМС. А вот для определения исходных данных, необходимых для модельного прогноза условных вероятностей всех исходов дерева событий, рекомендуется использовать предложенные ниже (см. гл. 14) модели истечения, распространения, трансформации и разрушительной адсорбции энергии или вредного вещества.

13. Прогноз количества  $M(K)$  энергии и (или) вещества, способных к аварийному высвобождению из ОПУ, и состава доминирующих в разных сценариях первичных и вторичных поражающих факторов также следует осуществлять с помощью соответствующих моделей энерго-массообмена либо на основе обработки аналогичных статистических данных. В частности, при этом нужно иметь в виду следующие особенности: а) рассеяние, воспламенение или детонация топливовоздушных смесей с образованием фугасного, осколочного, термического и токсичного поражающих факторов; б) столкновение возникших при этом движущихся тел с проявлением дробящего или деформирующего эффекта; в) возникновение коротких замыканий в электросетях, сопровождающихся тепловым и электромагнитным излучениями.

Подобным способом нужно прогнозировать параметры только что перечисленных и других поражающих факторов, сопутствующих каждому рассматриваемому сценарию возможного аварийного высвобождения энергозапаса ОТУ, включая вторичные поражающие факторы его последующей интенсивной трансформации.

14. Оценку вероятности  $Q_{ab}^I$  прямого ущерба следует проводить исходя из частоты разрушительного воздействия поражающих факторов выброса на незащищенные ресурсы и с учетом поглощенной ими дозы  $DP$  поражающего фактора. Степень же повреждения различных объектов и меру соответствующей возможности  $Q_i^I$  целесообразно определять либо детерминистским методом — путем сравнения полученных доз с пороговыми для этих объектов значениями, либо вероятностным, т.е. с помощью приводимых ниже (см. параграф 15.2) зависимостей «доза — эффект» и основанных на них пробит- и эрфик-функциях.

Учитывая большое число факторов, влияющих на характер повреждения конкретных объектов, при определении частоты причинения прямого ущерба рекомендуется рассматривать не менее чем два-три доминирующих опасных сценария и две-три степени поражения объектов из состава людских, материальных и природных ресурсов.

15. Размеры ожидаемых при этом зон вероятного  $\Pi_i^Q$ , достоверного  $\Pi_i$  поражения и потенциалы действующих в них поражающих факторов (токсонагрузка в полях концентрации вредных веществ, импульс либо перепад давлений на фронте воздушной ударной волны, интенсивность теплового излучения и т.д.) должны рассчитываться с помощью излагаемых ниже специальных моделей рассеяния и энергораспространения либо по имеющимся статистическим данным. В первом случае нужно использовать пакеты прикладных программ численного моделирования или интегрирования систем дифференциальных уравнений либо приближенные аналитические модели в виде параметрических формул. Во втором случае можно ограничиться детерминистскими критериями и представлять зоны достоверного поражения разной тяжести кругом или сферой с центром в месте появления поражающих факторов.

Оценку вероятностей  $Q_{ab}^{II}$  и  $Q_i^{II}$  или частот причинения косвенного (вторичного) ущерба следует проводить с помощью дополнительных моделей, учитывающих последствия нарушения связей между поврежденным ОПО и другими объектами техно- или биосферы. При уяснении причин, возможности причинения и размеров этого ущерба основное внимание нужно уделять: а) для людских ресурсов — учету вынужденной миграции населения из регионов дислокации ОПО, а также ухудшению его психофизиологического здоровья; б) для материальных ресурсов — живучести коммуникаций между производственными и снабженческими предприятиями, а также наличию

запасов сырья, комплектующих материалов и резервных способов их пополнения; в) для природных ресурсов — последствиям возможного разрыва трофических цепей и ослабления естественных геобиохимических циклов миграции вещества в природе.

Что касается прогноза параметров причинения косвенного ущерба, то для редко встречающихся катастроф и аварий на ОПО значения  $Q_{\text{сб}}^{\text{II}}$  и  $Q_i^{\text{II}}$  можно приравнять к частоте или вероятности появления подобных происшествий. Однако по мере роста их повторяемости вероятность  $Q^{\text{II}}$  и тяжесть  $Y^{\text{II}}$  косвенных издержек будут постепенно снижаться вследствие постепенной адаптации хозяйственной или природной системы, например за счет дублирования ненадежных связей, принятия заблаговременных мер по созданию каких-либо резервов, акклиматизации и адаптации биологических особей и популяций.

16. Предварительную приближенную оценку суммарного ущерба также целесообразно осуществлять по формулам (13.3) и (13.4), соответствующие слагаемые которых учитывают не только прямой ущерб от аварийных и иных вредных выбросов ОПО, но и косвенный. При этом следует также помнить об изменении параметров данных формул в течение года и суток. Например, насыщенность  $F_i$  флорой и (или) поголовье фауны в зонах возможного поражения будут различными зимой и летом, тогда как численность людей в жилых и промышленных районах населенного пункта, а также вероятность  $Q_i$  систематических вредных материальных выбросов из ОПО — в дневное и ночное время.

17. Суммарная частота причинения ущерба людским, материальным и природным ресурсам в первом приближении может определяться суммированием частот его первичного и вторичного проявления. При необходимости в более точной оценке этого параметра потребуются введение соответствующих весов или условных вероятностей, позволяющих оперировать средневзвешенными частотами возникновения прямого и косвенного ущерба. Кроме того, в ряде случаев следует оговаривать временной лаг причинения ущерба окружающей среде, с тем чтобы учесть возможную латентность его образования вследствие постепенного накопления загрязнений, а также из-за ухудшения жизнестойкости популяций флоры и фауны вблизи места дислокации ОПО по причине распространения вредных веществ по трофическим цепям ареала их обитания.

18—19. Определение частот и объемов случайных вредных выбросов следует проводить последовательно для всех ОТУ, имеющих в составе ОПО. Подобным образом нужно относиться и к каждому рассматриваемому сценарию, т.е. рассчитывать суммарные частоты и ущербы от аварийных выбросов как математические ожидания соответствующих дискретных случайных величин. Аналогичную проце-

дуру целесообразно использовать и для априорной оценки совокупного ущерба всем тем объектам из состава людских, материальных и природных ресурсов, которые оказались под воздействием не только случайных, но и иных вредных выбросов ОПО.

20—21. Количественная оценка интегрального риска, связанного с вводом в эксплуатацию, функционированием и ликвидацией ОПО должна проводиться последовательно, путем рассмотрения всех вероятных сценариев проявления соответствующих источников с их разрушительным воздействием на людские, материальные и природные ресурсы.

Возможные отличия данного этапа от предыдущих могут заключаться в следующем: а) рассматриваются не отдельно взятые выбросы из различных ОГУ, а все возможные сценарии и их различные сочетания; б) для людских и природных ресурсов учитывается вероятность нелинейного роста суммарного ущерба вследствие проявления синергетического эффекта из-за аккумуляции повреждений, накопленных ранее различными объектами. Учет последней особенности можно реализовать, например, путем введения в формулы (13.3) и (13.4) дополнительного слагаемого — суммы произведений вероятностей наступления кумулятивного эффекта и размеров дополнительного ущерба от него.

22. Решение о соответствии оцененной меры возможности проявления источников техногенного риска его приемлемому значению принимается путем сопоставления случайного доверительного интервала  $[Q_{\tau}^H, Q_{\tau}^B]_{\gamma}$  с допустимым для нее значением соответствующей вероятности  $Q^*(\tau)$ . При этом рекомендуется следующее решающее правило: если  $Q^*$  «накрывается»  $[Q_{\tau}^H, Q_{\tau}^B]_{\gamma}$ , то уровень техногенного риска удовлетворяет данному условию с выбранной доверительной вероятностью  $\gamma$ ; в противном случае для подобного заключения имеющейся информации недостаточно, что указывает на необходимость дополнительных исследований или продолжения наблюдений за соответствующим ОПО.

23—25. При невозможности принятия решения на предыдущем шаге целью завершающего этапа рассматриваемой здесь обобщенной процедуры может стать проверка равнозначности вклада каждого ОГУ в величину оцененного техногенного риска. В случае выявления на ОПО нескольких источников повышенной опасности и наличия альтернативных мероприятий по их исключению или локализации целесообразно определить предполагаемую результативность последних с помощью соответствующих моделей, а затем выбрать из них оптимальные по выбранному критерию.

На этом ограничимся в пояснении процедуры, изображенной на рис. 13.4. В завершение параграфа и главы в целом отметим, что ее использование может способствовать повышению результативно-

сти менеджмента техногенного риска благодаря системности исследования всех его источников и росту достоверности прогнозных параметров возможного ущерба.

## Вопросы и задания для самопроверки

1. Перечислите факторы, влияющие на величину ущерба от происшествий в техносфере.
2. На какие этапы целесообразно декомпозировать процесс причинения ущерба от техногенных происшествий?
3. Всегда ли целесообразно декомпозировать на четыре этапа процесс причинения ущерба от аварийно высвободившихся потоков энергии?
4. Какие вопросы подлежат выяснению в ходе системного исследования процесса аварийного высвобождения энергии и вредного вещества, накопленных в объектах техносферы?
5. Какова конечная цель системного исследования процесса аварийного высвобождения энергии и вредного вещества?
6. Укажите тенденции, характерные для распространения в неподвижной атмосфере продуктов залпового выброса газообразных вредных веществ.
7. Как обычно распространяются в неподвижной атмосфере продукты выброса газообразных вредных веществ при их непрерывном выбросе?
8. Каким образом сказывается влияние подвижности атмосферы и других факторов, действующих на оказавшиеся в ней вредные выбросы?
9. В чем заключается конечная цель системного исследования процесса распространения аварийных выбросов?
10. От чего зависят возможность и характер трансформации продуктов аварийного выброса?
11. Назовите наиболее типичные формы превращения в атмосфере аварийных выбросов АХОВ и обусловленные этим поражающие факторы.
12. Перечислите признаки, с помощью которых можно отличить трансформацию вещества в форме детонации от дефлаграции.
13. Какова конечная цель системного анализа этапа возможной трансформации АХОВ?
14. От каких факторов зависят последствия воздействия продуктов аварийного выброса на живые и неживые объекты?
15. На какие виды целесообразно декомпозировать ущерб, связанный с разрушительным эффектом техногенных происшествий?
16. Перечислите группы моделей, наиболее пригодных для системного исследования процесса причинения ущерба.
17. Укажите слабые и сильные стороны метода численного моделирования и обусловленную этим область его предпочтительного использования.
18. В чем состоит идея построения интегральных моделей и с чем связаны особенности прогнозирования с их помощью полей концентрации?

19. На каких этапах системного анализа процесса причинения техногенного ущерба целесообразно использовать параметрические формулы и почему?
20. На чем основана идея формализации процесса прогнозирования техногенного ущерба, положенная в основу обобщенной методики, схематично изображенной на рис. 13.4?

**Ситуационная задача.** При перевозке автотранспортом негерметичных ящиков, в которых находились покрытые смазкой детали, предназначенные для использования при конвейерной сборке легковых автомобилей, произошло дорожно-транспортное происшествие, завершившееся повреждением автомобиля, опоры с электропроводами, головы водителя и попаданием ящиков в находящуюся рядом с дорогой реку. Назовите причиненный аварией ущерб, поделив его на прямой и косвенный.

# **Прогнозирование параметров аварийного истечения и распространения энергозапаса**

В начале данной главы демонстрируется относительная легкость исследования процессов аварийного высвобождения механической, тепловой и электрической энергии и распространения инертных и не меняющих агрегатное состояние веществ, ионизирующих частиц и электромагнитных излучений. Сложнее обстоит дело с рассматриваемым затем неконтролируемым рассеянием вредных и горючих веществ, которое моделируется громоздкими полуэмпирическими формулами и системами уравнений. Их работоспособность подтверждается на примерах количественного анализа с привлечением специализированной компьютерной программы.

## **14.1. Особенности прогнозирования параметров неконтролируемого истечения и распространения потоков энергии и вредного вещества**

Последовательно проиллюстрируем специфические особенности рассматриваемого здесь прогноза на конкретных примерах, начиная с высвобождения и неконтролируемого распространения потоков аварийно высвободившейся энергии. При этом в качестве соответствующую

щих моделей будут использоваться простейшие формулы классической физики, параметрами которых служат масса и скорость тела, интенсивность источника опасных излучений и степень ослабления их потока средой либо экранирующими устройствами.

Так, величины кинетической энергии  $\mathcal{E}_k$  и центробежной силы  $F_{цб}$  порожденных инертностью движущихся тел, рассчитываются по следующим уравнениям механики:

$$\mathcal{E}_k = MW^2/2; F_{цб} = MW^2/R, \quad (14.1)$$

тогда как размеры потенциальной энергии  $\mathcal{E}_{пт}$  — накопленной под влиянием земного тяготения и  $\mathcal{E}_{пр}$  — выделяемой при адиабатическом расширении газа, находящегося в объеме  $V$ , м<sup>3</sup>, под избыточным давлением  $P$ , Па, — следующим образом:

$$\mathcal{E}_{пт} = MgB; \mathcal{E}_{пр} = PV\gamma[(P/P_0)^{(1-\gamma)/\gamma} - 1]/(\gamma - 1), \quad (14.2)$$

где  $M$ ,  $W$ ,  $R$  и  $B$  — соответственно масса, кг, мгновенная скорость, м/с, радиус, м, криволинейного движения тела и высота, м, центра его масс относительно Земли;  $g$  — ускорение свободного падения;  $P$  и  $P_0$  — давления газа до и после расширения, Па;  $\gamma$  — показатель его адиабаты.

Для определения расстояний, в пределах которых может проявиться вредный эффект энергии движущихся тел, помимо ее величины необходимо знать сопротивление, оказываемое окружающей средой. В общем случае дальность распространения потока такой энергии определяется ее делением на противодействующую этому среднюю силу. При этом аэродинамическое сопротивление  $F_{ас}$  атмосферы оценивается по следующему соотношению:

$$F_{ас} = k_{лс}\rho W^2 P_{лс} / 2, \quad (14.3)$$

где  $k_{лс}$  — коэффициент лобового сопротивления, учитывающий сжатие и разрежение воздушного потока после обтекания движущего тела с мгновенной скоростью  $W$ , м/с;  $\rho$  — плотность атмосферы, кг/м<sup>3</sup>;  $P_{лс}$  — площадь того наибольшего сечения тела, которое перпендикулярно скорости движения или направлению обтекающего тело потока, м<sup>2</sup>.

Приведенные параметрические формулы свидетельствуют, что область неуправляемого распространения потока механической энергии однозначно определяется величиной как самой этой энергии, так и противодействующей ей силы. Проявляется это, например, в том, что при столкновении твердых тел возникает большая перегрузка, а совершаемая при этом работа идет на их разрушение или изменение положения в пространстве. Взаимодействие же упругих тел к тому же сопровождается еще их деформацией и нагревом.



Что касается АХОВ, например сжиженного газа и криогенной жидкости, способных менять агрегатное состояние при высвобождении из емкости, то для прогноза параметров их истечения и распространения приведенные выше формулы оказываются уже малопригодными. Вот почему здесь часто используют упрощенные сценарии (полное или частичное опорожнение емкости), описываемые полуэмпирическими зависимостями с постоянными коэффициентами. Однако дефицит ретроспективных данных о подобных ситуациях и невозможность прогноза их параметров этим же способом потребовали привлечения более сложных моделей, точнее описывающих истечение и распространение вредного вещества.

Последнее обстоятельство, равно как и необходимость прогноза параметров непрерывного истечения подобных веществ, накладывает дополнительные требования к рассматриваемым здесь методам прогнозирования. В частности, они должны учитывать особенности высвобождения и распространения энергии и вещества из мгновенных и эпизодически действующих источников, с тем чтобы прогнозировать интенсивность создаваемых ими истечений, размеры заполняемых пространств, а также плотность потоков энергии или концентрации вредного вещества в них с учетом соответствующей «подпитки». Кроме того, применяемые при этом методики должны опираться на доступную информацию и позволять проводить прогноз в реальном масштабе времени, с малыми затратами и приемлемой точностью, тогда как лежащие в их основе модели истечения и распространения — учитывать, что:

- а) излучаемые и циркулирующие вокруг ОТУ потоки энергии и вещества будут состоять не только из различных газов и жидкостей, но также из твердых тел, волн и микрочастиц;
- б) их источники могут иметь разную геометрию, а также импульсный, непрерывный или случайный (по времени и интенсивности) режим работы;
- в) средой распространения будут атмосфера и гидросфера, характеризующиеся разной подвижностью и спецификой подстилающей поверхности.

Что касается исходной информации, необходимой для прогноза параметров истечения и распространения энергии и вредного вещества, то она должна включать:

- 1) источник вредных выбросов — его координаты, объем, термодинамические параметры или мощность, геометрию места разгерметизации или нежелательного высвобождения;
- 2) истекающий поток — характеристики вида энергии или вредного вещества, раскрывающие его инертность либо агрессивность для окружающей среды;

щих моделей будут использоваться простейшие формулы классической физики, параметрами которых служат масса и скорость тела, интенсивность источника опасных излучений и степень ослабления их потока средой либо экранирующими устройствами.

Так, величины кинетической энергии  $\mathcal{E}_k$  и центробежной силы  $F_{цб}$  порожденных инертностью движущихся тел, рассчитываются по следующим уравнениям механики:

$$\mathcal{E}_k = MW^2/2; F_{цб} = MW^2/R, \quad (14.1)$$

тогда как размеры потенциальной энергии  $\mathcal{E}_{пт}$  — накопленной под влиянием земного тяготения и  $\mathcal{E}_{гр}$  — выделяемой при адиабатическом расширении газа, находящегося в объеме  $V$ ,  $\text{м}^3$ , под избыточным давлением  $P$ , Па, — следующим образом:

$$\mathcal{E}_{пт} = MgB; \mathcal{E}_{гр} = PV\gamma[(P/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1]/(\gamma-1), \quad (14.2)$$

где  $M$ ,  $W$ ,  $R$  и  $B$  — соответственно масса, кг, мгновенная скорость, м/с, радиус, м, криволинейного движения тела и высота, м, центра его масс относительно Земли;  $g$  — ускорение свободного падения;  $P$  и  $P_0$  — давления газа до и после расширения, Па;  $\gamma$  — показатель его адиабаты.

Для определения расстояний, в пределах которых может проявиться вредный эффект энергии движущихся тел, помимо ее величины необходимо знать сопротивление, оказываемое окружающей средой. В общем случае дальность распространения потока такой энергии определяется ее делением на противодействующую этому среднюю силу. При этом аэродинамическое сопротивление  $F_{ac}$  атмосферы оценивается по следующему соотношению:

$$F_{ac} = k_{ac}\rho W^2 S_{ac} / 2, \quad (14.3)$$

где  $k_{ac}$  — коэффициент лобового сопротивления, учитывающий сжатие и разрежение воздушного потока после обтекания движущегося тела с мгновенной скоростью  $W$ , м/с;  $\rho$  — плотность атмосферы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $S_{ac}$  — площадь того наибольшего сечения тела, которое перпендикулярно скорости движения или направлению обтекающего тело потока,  $\text{м}^2$ .

Приведенные параметрические формулы свидетельствуют, что область неуправляемого распространения потока механической энергии однозначно определяется величиной как самой этой энергии, так и противодействующей ей силы. Проявляется это, например, в том, что при столкновении твердых тел возникает большая перегрузка, а совершаемая при этом работа идет на их разрушение или изменение положения в пространстве. Взаимодействие же упругих тел к тому же сопровождается еще их деформацией и нагревом.

Что касается АХОВ, например сжиженного газа и криогенной жидкости, способных менять агрегатное состояние при высвобождении из емкости, то для прогноза параметров их истечения и распространения приведенные выше формулы оказываются уже малопригодными. Вот почему здесь часто используют упрощенные сценарии (полное и частичное опорожнение емкости), описываемые полуэмпирическими зависимостями с постоянными коэффициентами. Однако дефицит ретроспективных данных о подобных ситуациях и невозможность прогноза их параметров этим же способом потребовали привлечения более сложных моделей, точнее описывающих истечение и распространение вредного вещества.

Последнее обстоятельство, равно как и необходимость прогноза параметров непрерывного истечения подобных веществ, накладывает дополнительные *требования* к рассматриваемым здесь методам прогнозирования. В частности, они должны учитывать особенности высвобождения и распространения энергии и вещества из мгновенных и эпизодически действующих источников, с тем чтобы прогнозировать интенсивность создаваемых ими истечений, размеры заполняемых пространств, а также плотность потоков энергии или концентрацию вредного вещества в них с учетом соответствующей «подпитки». Кроме того, применяемые при этом методики должны опираться на доступную информацию и позволять проводить прогноз в реальном масштабе времени, с малыми затратами и приемлемой точностью, тогда как лежащие в их основе модели истечения и распространения — учитывать, что:

а) излучаемые и циркулирующие вокруг ОТУ потоки энергии и вещества будут состоять не только из различных газов и жидкостей, но также из твердых тел, волн и микрочастиц;

б) их источники могут иметь разную геометрию, а также импульсный, непрерывный или случайный (по времени и интенсивности) режим работы;

в) средой распространения будут атмосфера и гидросфера, характеризующиеся разной подвижностью и спецификой подстилающей их поверхности.

Что касается исходной информации, необходимой для прогноза параметров истечения и распространения энергии и вредного вещества, то она должна включать:

1) источник вредных выбросов — его координаты, объем, термодинамические параметры или мощность, геометрию места разгерметизации или нежелательного высвобождения;

2) истекающий поток — характеристики вида энергии или вредного вещества, раскрывающие его инертность либо агрессивность для внешней среды;

3) среду распространения — геометрию и параметры, определяющие сопротивление истечению, трансляции или рассеянию соответствующих потоков.

Выходная информация применяемых здесь моделей должна характеризовать:

а) объемы вредных веществ и энергии, высвободившихся из технологического оборудования ОТУ, а также их концентрацию и потенциал в разных точках пространства;

б) геометрию и динамику размеров зоны загрязнения вредными веществами или параметров действующих внутри нее потоков энергии;

в) характеристики концентрационного поля в точках этой зоны, включая изоповерхности потенциалов энергии и токсонагрузок вредного вещества.

Анализ только что сформулированных требований свидетельствует о невозможности их одновременного удовлетворения с помощью одной универсальной модели, а значит — о целесообразности использования совокупности различных моделей и основанных на них методик, отличающихся сферой практического применения. Проиллюстрируем многообразие подобного инструментария на примере довольно общей системы классификации и кодирования известных моделей по признакам, существенным для рассматриваемого здесь процесса истечения и распространения вредных или аварийно химически опасных веществ.

Модели этого типа удобно классифицировать по следующим признакам:

а) теоретический базис физического процесса: 1 — диффузия, 2 — дисперсия;

б) геометрия источника истечения: 0 — точечный, 1 — линейный, 2 — площадной;

в) временной режим его работы: 1 — практически мгновенно, 2 — неустановившийся (переменная интенсивность в течение рассматриваемого времени  $t$ ), 3 — установившийся ( $t \rightarrow \infty$ ) и 4 — эпизодические залповые выбросы;

г) размерность заполняемой зоны: 1 — одномерная, 2 — двумерная, 3 — трехмерная;

д) активность заполняющего ее вещества: 0 — инертное, 1 — неинертное, подверженное химическим или фазовым превращениям;

е) условия на границах зоны его рассеяния: 0 — нулевая концентрация при большом удалении от места выброса, 1 — полное отражение вещества на границе, 2 — его поглощение там.

Что касается известных нормативных методик, рекомендуемых для ручной и автоматизированной оценки параметров аварийного

истечения и распространения энергозапаса, то не все они удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Например, при прогнозировании утечек с помощью программного комплекса [15] рекомендуется рассматривать лишь два расчетных сценария: 1) высвобождение всего его количества  $K$  по причине разрушения емкости; 2) ее частичное опустошение из-за утраты герметичности. В первом случае величина высвободившегося газообразного вещества приравнивается всему хранимому там количеству, а если оно неизвестно, то рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \mu VP / (RT), \quad (14.4)$$

где  $\mu$  — молярная масса, кг/моль;  $V$  — объем, м<sup>3</sup>;  $P$  — давление, Па;  $T$  — температура (К) АХОВ;  $R$  — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(К·моль).

Подобным, но более громоздким способом нормативные методики требуют прогнозировать и объем пролитого жидкого вещества. Последнее связано с необходимостью учета той его части, которая в емкости находится в газокapельной фазе, а затем испаряется по мере уменьшения жидкости. В частности, интенсивность  $q$ , кг/с, высвобождения газокapельного АХОВ при частичной разгерметизации соответствующей емкости рекомендуется оценивать по наименьшему значению правой части следующей формулы:

$$q = 0,8S \min \left\{ \left[ 2P\rho\gamma / (\gamma - 1) \right] \left[ (P_0 / P)^{2/\gamma} - (P_0 / P)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]^{1/2}; \left\{ P\rho\gamma \left[ 2 / (\gamma + 1) \right]^{(\gamma+1)(\gamma-1)/2} \right\} \right\}, \quad (14.5)$$

где  $S$  — площадь отверстия разгерметизации емкости, м<sup>2</sup>;  $P, P_0$  — величины давлений внутри и за ее пределами, Па;  $\rho, \gamma$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>, и показатель адиабаты газокapельной смеси.

Что касается интенсивности  $q$ , кг/с, истечения жидкости через отверстие площадью  $S$ , м<sup>2</sup>, то она рассчитывается по более сложным формулам, также учитывающим возможность ее вскипания:

$$q = 0,6S \sqrt{2Hg\rho_{ж}^2 + 2\rho_{ж}(P - p_n(T)) + \frac{1}{U} \frac{\Delta Q^2 \rho^2(T, p_n(T))}{C_p T_{кип}}}, \quad (14.6)$$

где  $H$  — высота столба жидкости над отверстием, м;  $g$  — ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $p_n(T)$  — давление насыщенных паров при температуре  $T$ , Па;  $\Delta Q$  — теплота испарения жидкости, Дж/кг;  $T_{кип}$  — температура кипения жидкости, К;  $\rho[T, p_n(T)]$  — плотность газовой фазы жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  — удельная теплоемкость жидкости при этих же значениях температуры и давления внутри емкости, Дж/(кг·К).

Величина начальной скорости  $U$ , м/с, струи, истекающей в этих же условиях из трубопровода диаметром  $D$ , м, зависит от удаления  $L$ , м, отверстия от его начала и равна

$$U = \begin{cases} \frac{\Delta Q_{\text{юм}}^2 \rho^2 [T, p_n(T)]}{2\rho_{\text{ж}}(p_n(T) - P_0)C_p T_{\text{юм}}} + \frac{L}{30D}, & 0 \leq L \leq 30D; \\ 1,18, & 30D < L \leq 50D; \\ 1,33, & 50D < L \leq 100D; \\ 1,54, & 100D < L \leq 200D; \\ 1,82, & 200D < L \leq 400D; \\ 2,1, & 400D < L. \end{cases} \quad (14.7)$$

Подобным образом рекомендуется определять время истечения жидкого и газообразного вредного вещества из резервуара и трубопровода. Так, при известном количестве  $K$ , кг, вредного вещества, найденного по формуле (14.4), длительность  $\tau$ , с, его истечения должна рассчитываться таким образом:

$$\tau = \mu VP / (RTq). \quad (14.8)$$

Что касается высвобождения и распространения потоков энергии, то прогноз количественных параметров данной стадии процесса причинения техногенного ущерба не вызывает принципиальных трудностей. В большинстве случаев здесь можно использовать простые физические соотношения для механической, тепловой, электрической и иной энергии, динамика потоков которых досконально изучена. Столь же хорошо известны экранирующая способность конструкционных и природных материалов и сопротивление различных сред распространению только что упомянутых потоков.

Завершая изложение особенностей прогнозирования параметров истечения и распространения энергии и вредного вещества, приведем статистические данные, пригодные для проверки достоверности результатов соответствующего моделирования. Так, при прогнозах утечки перевозимых жидких АХОВ через образуемые в их емкости негерметичности можно использовать следующие соотношения:

- а) из автоцистерн в 60% случаев вытекает до 10% их содержимого; в 20% случаев — до 30% и в оставшихся 20% случаев — весь их объем;
- б) из железнодорожных емкостей в половине случаев теряется до 10%, в одном из пяти — до 30%, а в 30% — все перевозимое вещество.

## 14.2. Краткая характеристика моделей и методов прогнозирования параметров неуправляемого распространения аварийно высвободившегося энергозапаса

Возможность системного исследования процесса образования рассматриваемых здесь зон продемонстрируем последовательно: вначале для аварийно высвободившихся потоков энергии, а затем — вредного вещества. Его целью будет прогнозирование параметров этих зон и действующих в них первичных и вторичных поражающих факторов. Основное внимание при этом уделим прогнозу параметров тех процессов, которые сопровождаются:

1) физико-химическими превращениями аварийно образовавшихся ТВС;

2) распространением в атмосфере токсичных парогазовых и мелкодисперсных смесей.

В первом случае преобладающими опасными факторами взрыва и горения соответственно являются фугасное воздействие и тепловое излучение. При прогнозе последствий фугасного воздействия на объекты вблизи эпицентра взрыва наибольший интерес представляет оценка избыточного давления  $\Delta P_\phi$  на фронте воздушной ударной волны. Поскольку классическая формула М. Садовского дает большие погрешности на малом и большом удалении от эпицентра взрыва, величину этого поражающего фактора следует рассчитывать по следующим более точным выражениям:

$$\Delta P_\phi = [(1,6 + 0,9\bar{X}_\phi)/\bar{X}_\phi]^2 - 1)P_0; \quad \bar{X}_\phi = X_\phi / \Xi_\tau^{1/3}, \quad (14.9)$$

где  $X_\phi$  — расстояние от центра взрыва, м;  $P_0$  — стандартное атмосферное давление, равное 103,32 кПа;  $\Xi_\tau$  — тротиловый эквивалент взорвавшейся ТВС, кг. При этом для ТВС, образованной горючим газом, параметр  $\Xi_\tau$  можно оценивать по следующей формуле:

$$\Xi_\tau = 0,0097k_{гв}\beta_0\nu_0K_{гв}, \quad (14.10)$$

где  $k_{гв}$  — доля участвующей во взрыве ТВС;  $\beta_0$  — коэффициент, корректирующий ее удельную энергоемкость относительно некоторого эталонного значения;  $\nu_0$  — параметр, учитывающий усиление избыточного давления при отражении воздушной ударной волны от твердой поверхности (для приземного взрыва  $\nu_0 = 2$ );  $K_{гв}$  — количество газа в ТВС, кг.

Для взрыва мелкодисперсных ТВС прогноз избыточного давления  $\Delta P_\phi$  рекомендуется осуществлять по следующей полуэмпирической формуле:

$$\Delta P_{\phi} = K_{\text{дл}} Q_{\text{дл}} P_0 k_{\text{ув}} / (V_{\text{дс}} \rho_0 C_0 T_0 K_{\text{на}}), \quad (14.11)$$

где  $K_{\text{дл}}$ ,  $Q_{\text{дл}}$  — количество, кг, и удельная теплота сгорания, Дж/кг, рассеянной горючей пыли;  $k_{\text{ув}}$  — доля, %, ее участия во взрывном физико-химическом превращении;  $V_{\text{дс}}$  — объем облака этой ТВС, м<sup>3</sup>;  $P_0$ ,  $\rho_0$ ,  $T_0$  — начальные давление, МПа, плотность, кг/м<sup>3</sup>, температура, К, данной горючей смеси;  $K_{\text{на}}$  — коэффициент неадиабатичности ее расширения;  $C_0$  — удельная теплоемкость атмосферного воздуха, Дж/(кг·К).

Уточним, что при использовании двух последних формул необходимо:

а) величину параметра  $k_{\text{ув}}$  выбирать из отрезка [0,1; 0,5], с учетом того что его меньшие значения должны соответствовать открытым пространствам, средние — замкнутым объемам, а самые максимальные — водородным смесям;

б) определение коэффициента  $\beta_0$  осуществлять с помощью специальной литературы, например по приводимой ниже табл. 15.2 или другим источникам;

в) значение коэффициента  $K_{\text{на}}$  принимать равным трем.

Однако более точные оценки параметров фугасного эффекта воздушной ударной волны дают методики, в которых вместо  $\Delta P_{\phi}$  и времени  $t$  используются импульсы давления:  $I_+$  — для фазы сжатия и  $I_-$  — разрежения, Па·с. Физический смысл и величина последних помечены штриховкой на рис. 14.1, а.

Несмотря на более высокие параметры фазы сжатия (верхняя заштрихованная площадь), значительным поражающим эффектом обладает и фаза разрежения (нижний сегмент) воздушной ударной волны, вызванная «схлопыванием» облака ТВС после ее выгорания. На графиках «импульс — вероятность  $R$  поражения» людей (рис. 14.1, б) это отражено разными тангенсами угла наклона ( $\Delta I_+ / \Delta R$  и  $\Delta I_- / \Delta R$ ) соответствующих кривых в начале и конце диапазона возможных значений этой вероятности. Причина подобного влияния вакуума — эво-

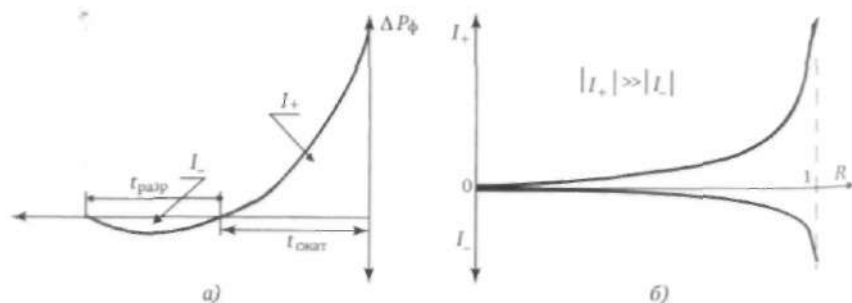


Рис. 14.1. Факторы и параметры воздушной ударной волны:

а — импульсы давления; б — графики «импульс — вероятность поражения»



люционная неготовность живых организмов парировать давления, меньшие атмосферного.

Не менее актуально прогнозирование зон возможного термического поражения. Например, АХОВ типа криогенных жидкостей и сжиженных горючих газов способны выделять накопленную в них энергию следующими четырьмя способами:

- а) вспышка с образованием огненного шара;
- б) взрыв облака пара, появившегося в результате пролива и последующего вскипания переохлажденной жидкости (BLEVE);
- в) факельное струйное горение истекающих потоков этого вещества;
- г) поверхностное выгорание горючей жидкости в пределах площади ее пролива.

Последовательно проиллюстрируем порядок оценки параметров для первой и последней из только что перечисленных ситуаций.

Так, параметры огненного шара, образовавшегося в результате воспламенения количества  $K_{уг}$ , т, углеводородного газа, — диаметр  $D_{ош}$ , м, выделяемая мощность  $E_{ош}$ , ГВт, и время существования  $\tau_{ош}$ , с, — можно оценить по следующим эмпирическим соотношениям [13]:

$$D_{ош} = 55K_{уг}^{0,375}; E_{ош} = 12,3K_{уг}^{2/3}; \tau_{ош} = 3,8K_{уг}^{1/3}, \quad (14.12)$$

а интенсивность  $q_{ош}$ , кВт/(с·м<sup>2</sup>), излучаемого им теплового потока — по формуле

$$q_{ош} = \frac{k_{ти} K_{уг} Q_{г}}{12,56 \cdot (D_{ош} / 2)^2 \tau_{ош}}, \quad (14.13)$$

где  $k_{ти}$  — доля лучистой энергии горящего углеводородного газа, обычно оцениваемая диапазоном 0,15—0,45;  $Q_{г}$  — его удельное теплосодержание, примерно равное 45—48 МДж/кг.

При *поверхностном* выгорании зеркала пролитой горючей жидкости размеры, ограничивающие в горизонтальном  $X_{НКПР}$  и вертикальном  $Z_{НКПР}$  направлениях объем пространства, в котором концентрация  $C_{НКПР}$  ее паров превышает нижний концентрационный предел распространения пламени в безветренную погоду, можно оценить по полуэмпирическим соотношениям:

а) для облака горючих газов, образованного проливом углеводородных топлив,

$$X_{НКПР} = 14,6 \cdot \left( \frac{m_{г}}{\rho_{г} \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}, Z_{НКПР} = 0,33 \cdot \left( \frac{m_{г}}{\rho_{а} \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}; \quad (14.14)$$

б) для парового облака мало нагретых легковоспламеняющихся жидкостей

$$X_{\text{НКПР}} = 3,2\sqrt{T} \left( \frac{P_n}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,8} \left( \frac{m_n}{\rho_n P_n} \right)^{0,33},$$

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,12\sqrt{T} \left( \frac{P_n}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,8} \left( \frac{m_n}{\rho_n P_n} \right)^{0,33}, \quad T = \tau/3600, \quad (14.15)$$

где  $m_r, m_n$  — масса указанных выше горючих газов и паров легковоспламеняющейся жидкости в облаке ТВС, кг;  $\rho_r, \rho_n$  — их плотность при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг·м<sup>-3</sup>;  $P_n$  — давление насыщенного пара при температуре хранения подобной жидкости, кПа;  $\tau$  — продолжительность ее поступления в открытое пространство, с.

Интенсивность генерируемого пожаром излучения  $I_\phi$ , Вт/м<sup>2</sup>, и выделяемый при этом тепловой поток  $q_t$ , кДж/(м<sup>2</sup>·ч) рекомендуется находить по полуэмпирическим формулам

$$\phi = \epsilon_\phi k_{\text{сб}} T_{\text{пф}}^4; \quad q_t = k_{\text{хн}} V_m \Pi_n Q_{\text{сг}} / (3,6 \Pi_{\text{тв}}), \quad (14.16)$$

где  $\epsilon_\phi$  и  $T_{\text{пф}}$  — степень черноты и температура, К, поверхности фронта огня (см. табл. Е.2 из приложения к данной книге);  $k_{\text{сб}}$  — постоянная Стефана — Больцмана, равная  $5,76 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $k_{\text{хн}}$  — коэффициент химического недожога;  $V_m$  — массовая скорость, кг/(м<sup>2</sup>·ч);  $Q_{\text{сг}}$  — теплота сгорания вещества, кДж/кг;  $\Pi_n, \Pi_{\text{тв}}$  — площадь пожара и поверхность его тепловыделения, м<sup>2</sup>.

Результаты расчета по формулам (14.15) тепловых потоков, образующихся длительным горением широкой фракции легких углеводородов на различных удалениях от очага пожара, проиллюстрированы с помощью табл. 14.1. В верхних строках в ней отражены значения этих потоков, излучаемые площадью горения с радиусом в 25 м, а в нижних — в 50 м.

Таблица 14.1. Величина ожидаемых тепловых потоков, кВт/м<sup>2</sup>

Метеоусловия	Удаление, м								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Безветренная погода	10	7,15	5,21	3,90	2,95	—	—	—	—
	—	—	15,4	12,0	9,8	8,0	6,6	5,5	4,6
Ветер, 5 м/с	28,7	—	17,5	—	10,2	—	5,3	—	2,7
	—	—	10	—	—	19	—	—	12

Однако для прогноза зон поражения  $\Pi_1^Q$  и  $\Pi_r$ , ранее учитываемых формулой (13.4), необходимы также данные о пороговых для конкрет-

ных объектов уровнях действующих опасных факторов — фугасного, термического и др. В частности, при оценке расстояний, на которых у людей появляются ожоги различной степени тяжести, следует исходить из удельной тепловой нагрузки на поверхность их тела, кДж/м<sup>2</sup>: для легкой степени — это 1,7 и более, для умеренной — 42—84, а для тяжелых ожогов — свыше 162.

В соответствии с подобными критериями могут быть рассчитаны радиусы зон достоверного причинения ущерба людям в форме ожогов каждой из упомянутых трех степеней тяжести. Например, значения этих радиусов для облака углеводородного газа весом К, т, горящего с образованием огненного шара, можно определять по эмпирическим формулам

$$R_{1t} = (5,2 \pm 0,2)K^{5/12}; R_{2t} = (3,7 \pm 0,2)K^{5/12}; \\ R_{3t} = (2,6 \pm 0,2)K^{5/12}. \quad (14.17)$$

Подобным образом можно оценивать размеры зоны термического повреждения материальных ценностей. Ряд значений критической мощности  $q_{кр}$ , кВт/м<sup>2</sup>, теплового воздействия на некоторые конструкционные материалы и его предельно допустимая длительность  $\tau_v$  от начала прогрева до их воспламенения представлены в табл. 14.2.

С помощью приведенных ранее формул (14.8)—(14.10) могут быть также получены априорные оценки зон распространения воздушной ударной волны облака воспламенившейся ТВС. Например, в табл. 14.3

Таблица 14.2. Критические тепловые потоки  $q_{кр}$ , кВт/м<sup>2</sup>, для разного времени прогрева  $\tau_v$

Конструкционный материал или продукция	$q_{кр}$ при $\tau_v$ , с:		
	50	100	200
Хлопчатобумажная ткань темная	10,7	3,0	0,92
Картон серый	11,85	3,1	0,94
Древесина сосновая	12,9	3,3	0,96
Битум, резина	10,2	3,4	0,97
Фанера крашеная	10,2	3,5	0,99

Таблица 14.3. Радиусы разрушительного эффекта воздушной ударной волны, м

Степень повреждения	Избыточное давление, кПа	Масса облака паров, кг	
		1000	10 000
Тяжелые повреждения зданий и людей	10—30	16	35
Полное разрушение стекол и контузии людей	3—10	54	117
Разрушение остекления (10%) и ушибы людей	1—3	163	352

приведены радиусы повреждения зданий и находящихся в них людей фугасным эффектом взрыва паров углеводородного топлива двух различных масс.

Дополнительные сведения о параметрах этих и других факторов имеются в работах [6, 27].

### 14.3. Обзор моделей и методов прогнозирования зон неуправляемого распространения выбросов вредного вещества

При прогнозировании параметров зоны распространения аварийно высвободившихся из ОТУ вредных веществ особое внимание будет уделено полям их концентрации  $c(r, t)$  в каждой точке  $r(x, y, z)$  соответствующей зоны на момент времени  $t$  от начала выброса. А сами они будут определяться с учетом особенностей не только вредного вещества и источника его выброса, но также несущей среды (атмосферы) и подстилающей поверхности (см. параграф 13.1).

Естественно, что наиболее достоверный прогноз функций  $c(r, t)$  возможен лишь путем решения системы дифференциальных уравнений в частных производных численным методом, учитывающим параметры рассматриваемого этапа в оригинальном виде. Особенно это касается истечения мощных струй и мгновенных выбросов большого количества вредных веществ, имеющих отличную от несущей среды температуру и плотность, например, при разрушениях коммуникаций и сосудов, работающих под большим давлением. В основу соответствующих соотношений положены следующие типовые балансы [31]:

а) уравнение сохранения массы (условие неразрывности)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{W}) = 0; \quad \frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{W} C) = \operatorname{div}[\rho \vec{K} \cdot \operatorname{grad}(C)]; \quad (14.18)$$

б) уравнения сохранения импульса

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{W} u_x) &= \operatorname{div}[\rho \vec{K} \cdot \operatorname{grad}(u_x)] - (\partial P / \partial X); \\ \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{W} u_y) &= \operatorname{div}[\rho \vec{K} \cdot \operatorname{grad}(u_y)] - (\partial P / \partial Y); \\ \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{W} u_z) &= \operatorname{div}[\rho \vec{K} \cdot \operatorname{grad}(u_z)] - (\partial P / \partial Z) - \rho g; \end{aligned} \quad (14.19)$$

в) уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{W} H) = \operatorname{div}[\rho \vec{K} \cdot \operatorname{grad}(H)] + \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (14.20)$$

где  $\rho$  — плотность паровоздушной смеси;  $P$  — ее давление;  $\vec{W}$  — скорость диффузионного потока в данной точке для момента времени  $t$ ;  $g$  — ускорение свободного падения;  $C$ ,  $\vec{K}$ ,  $H$  — массовая концентрация, турбулентная вязкость и энтальпия смеси;  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  — компоненты вектора скорости  $\vec{W}$  в направлении осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  прямоугольной системы координат.

Приведенные уравнения могут быть упрощены (допустим, предположением о несжимаемости подобной смеси) и усложнены, например путем учета аэрозолей в уравнениях баланса импульса и энергии, т.е. включением слагаемых межфазного обмена в неравновесной (по скорости и температуре) среде.

Для решения приведенной системы нужны уравнения замыкания:

$$P = \rho T [C R_r + (1 - C) R_a];$$

$$\Psi(T) = \begin{cases} 0, & T \leq 263 \text{ К}; \\ (T - 263) / 20, & 263 \text{ К} < T \leq 283 \text{ К}; \\ 1, & T > 283 \text{ К}; \end{cases}$$

$$H = [C_{pa}(1 - C) + C_{pr}C]T + q_{\text{фп}}\epsilon_a(1 - C)\Psi(T), \quad (14.21)$$

где  $R_a$ ,  $R_r$ ,  $C_{pa}$ ,  $C_{pr}$  — газовые постоянные и удельные теплоемкости при постоянном давлении для воздуха ( $a$ ) и газа ( $r$ ) в облаке-цилиндре;  $T$  — температура паровоздушной смеси;  $\epsilon_a$  — влагосодержание атмосферного воздуха;  $q_{\text{фп}}$  — теплота фазового превращения единицы массы имеющейся в нем влаги.

Примерно также можно прогнозировать распространение вредного вещества с помощью интегральных моделей, представленных системой дифференциальных обыкновенных уравнений. Чаще всего для этого рекомендуется использовать следующие соотношения [47], справедливые для рассеяния выбросов плотнее воздуха и характеризующие:

а) изменение во времени  $t$  формы цилиндрического облака под непрерывным воздействием гравитации ( $g$  — ускорение свободного падения):

$$\frac{dR}{dt} = k \sqrt{gB(\rho / \rho_{\text{воз}} - 1)}, \quad k = 1,15; \quad (14.22)$$

б) сохранение массы вредного вещества, сосредоточенной в этом облаке:

$$\frac{dM_{\text{воз}}}{dt} = \frac{dM_{\text{бок}}}{dt} + \frac{dM_{\text{вер}}}{dt}; \quad \frac{dM_{\text{вод}}}{dt} = k_{\text{вод}} \frac{dM_{\text{воз}}}{dt}; \quad \frac{dM_{\text{бок}}}{dt} = 2\rho_{\text{воз}} \pi R B \frac{dR}{dt};$$

$$\frac{dM_{\text{вер}}}{dt} = 2,15\rho_{\text{воз}} \pi R^2 \frac{U_*}{0,88 + 0,099[(\rho - \rho_{\text{воз}})gBU_*^2 / \rho_{\text{воз}}]^{1,04}}; \quad (14.23)$$

в) условия сохранения энергии, имеющейся в облаке с вредными примесями:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dq_{\text{вер}}}{dt} + \frac{dq_{\text{бок}}}{dt} + \frac{dq_{\text{под}}}{dt} = C_{V_{\text{воз}}} \frac{dM_{\text{воз.вер}}}{dt} + C_{V_{\text{вод}(\cdot)}} \frac{dM_{\text{вод}(\cdot)\text{вер}}}{dt} +$$

$$+ (C_{p_{\text{га}}(\text{ж})} - q_{\text{вод}}) \frac{dM_{\text{вод}(\text{ж})\text{вер}}}{dt} + C_V \frac{dM_{\text{воз.бок}}}{dt} + C_{V_{\text{вод}(\cdot)}} \frac{dM_{\text{вод}(\cdot)\text{бок}}}{dt} +$$

$$+ (C_{p_{\text{вод}(\text{ж})}} - q_{\text{вод}}) \frac{dM_{\text{вод}(\text{ж})\text{бок}}}{dt} + \pi R^2 (T_{\text{под}} - T)^{4/3}. \quad (14.24)$$

Энергомассообмен атмосферы с облаком вредного вещества через его верхнюю (вер), боковую (бок) и нижнюю поверхности происходит посредством диффузии, конвекции и излучения подстилающей поверхности, а его параметрами служат:  $R, B$  — радиус и высота облака-цилиндра с равномерно заполненным (допущение) вредным веществом;  $\rho$  — плотность в облаке-цилиндре;  $M_{\text{возд}}$  — масса воздуха в облаке-цилиндре;  $M_{\text{вод}}$  — масса воды в облаке-цилиндре;  $M$  — масса вредного вещества в облаке-цилиндре;  $M_{\text{вер}}$  — масса воздуха, поступившая в облако-цилиндр через верхнюю границу;  $M_{\text{бок}}$  — масса воздуха, поступившая в облако-цилиндр через боковую поверхность;  $k_{\text{вод}}$  — массовая доля воды в воздухе;  $T_{\text{под}}$  — температура подстилающей поверхности земли;  $T$  — температура внутри облака;  $Q$  — энергия, содержащаяся в облаке-цилиндре;  $q_{\text{вер}}$  — энергия, поступившая в облако через верхнюю поверхность;  $q_{\text{бок}}$  — энергия, поступившая в облако через боковую поверхность;  $q_{\text{под}}$  — энергия, поступившая в облако от подстилающей поверхности;  $C_p, C_V, C$  — удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме воздуха (воз), водяного пара (вод) и вредного вещества (без индекса) в газовой (г) и жидкой (ж) фазах;  $\rho_{\text{воз}}$  — плотность атмосферного воздуха;  $q_{\text{вод}}$  — теплота парообразования воды;  $f$  — коэффициент пропорциональности;  $k, g$  — константы;  $U^*$  — динамическая скорость, учитывающая влияние подстилающей поверхности на диффузию вредного вещества в воздухе<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Предназначение и способ использования данного параметра еще в одной модели будут изложены ниже — см. комментарии к формулам (14.36).

Для замыкания системы (14.22) — (14.24) с одиннадцатью неизвестными параметрами  $R, B, \rho, T, M_{\text{воз}}, M_{\text{вод(ж)}}, M_{\text{вод(г)}}, M_{\text{вод}}, M_{(г)}, M_{(ж)}$  и  $Q$  требуется еще пять следующих уравнений:

1) баланс общего количества вещества с массой всех его фаз:  $M = M_{(г)} + M_{(ж)}$ ;

2) соотношение между объемом и плотностью облака:  $\rho = M/(\pi R^2 B)$ ;

3) баланс суммарной массы воды и массы всех ее фазовых состояний в облаке с вредным веществом:  $M_{\text{вод}} = M_{\text{вод(г)}} + M_{\text{вод(ж)}}$ ;

4) баланс тепла во всем данном облаке при предположении однородности его состава и температуры:

$$Q_0 + q_{\text{под}} + M_{(ж)}q + M_{\text{вод(ж)}}q_{\text{вод}} = M_{(ж)}C_{p(ж)} + M_{(г)}C_{V(г)} + M_{\text{вод(ж)}}C_{p\text{вод(ж)}} + M_{\text{вод(г)}}C_{V\text{вод(г)}} + M_{\text{воз}}C_{V\text{воз}}; \quad (14.25)$$

5) начальная энергия всей рассматриваемой здесь трехкомпонентной системы, являющаяся первым слагаемым баланса тепла (14.25) и рассчитываемая по следующей формуле:

$$Q_0 = T(M_{(ж)}C_{p(ж)} + C_{V(г)}M_{(г)} + C_{V\text{вод(г)}}M_{\text{вод(г)}} + C_{V\text{воз}}M_{\text{воз}}) + M_{(ж)}q. \quad (14.26)$$

Несмотря на трудоемкость сбора исходных данных для приведенной выше системы уравнений, полученное при этом решение позволяет оценивать параметры поля концентрации  $c(r, t)$  лишь на дискретные моменты времени и приближенно, что вызвано принятыми допущениями, а также игнорированием начальных условий в районе распространения облака. Данное обстоятельство наряду с необходимостью привлечения вычислительной техники затрудняет широкое практическое использование двух только что рассмотренных систем уравнений для прогнозирования полей концентрации вредного вещества.

Вот почему чаще оперируют более простыми параметрическими формулами, базирующимися на закономерностях турбулентного обмена в атмосфере и вероятностно-статистических представлениях о рассеянии вредных веществ, которые имеют следующий вид [10]:

для мгновенного, т.е. залпового, выброса вредного вещества в атмосферу

$$c(r, t) = c(x, y, z, t) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(u_x t) \sigma_y(u_y t) \sigma_z(u_z t)} \times f(x, t) f(y, t) f(z, t) f_p(t) f_{oc}(t), \quad (14.27)$$

где

$$\begin{aligned}
 f(x,t) &= \exp\left\{-\frac{(x-u_x t)^2}{2\sigma_x^2(u_x t)}\right\}; \quad f(y,t) = \exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(u_x t)}\right\}; \\
 f(z,t) &= \exp\left\{-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2(u_x t)}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma_z^2(u_x t)}\right\}; \\
 f_p(t) &= \exp(-kt); \quad f_{oc}(t) = \exp\left\{-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{v_d}{u_x} \int_0^{z=u_x t} \frac{dz}{\sigma_z(z) \exp(z_0^2 / 2\sigma_z^2(z))}\right\}; \quad (14.28)
 \end{aligned}$$

для постоянно (непрерывно) действующего источника вредных выбросов

$$c(x, y, z) = \frac{m_0}{2\pi u_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\} \left[ \exp\left\{-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right], \quad (14.29)$$

где  $M$ ,  $z_0$  — масса выброшенного вещества и высота его источника над землей;  $f(x, t)$ ,  $f(y, t)$ ,  $f(z, t)$  — функции, характеризующие рассеяние вредного вещества вдоль каждой оси в момент  $t$ ;  $f_p(t)$ ,  $f_{oc}(t)$  — функции, учитывающие снижение концентрации из-за химического превращения и оседания этого вещества на землю;  $m_0$  — интенсивность его непрерывной эмиссии;  $v_d$  — скорость оседания;  $k$  — константа превращения частиц вещества в воздухе;  $\sigma_x(u_x t)$ ,  $\sigma_y(u_x t)$ ,  $\sigma_z(u_x t)$  — составляющие стандартного отклонения;  $u_x$  — скорость ветра вдоль оси  $X$ .

Обратим внимание, что в модели залпового выброса (14.27) функции  $f(x)$ ,  $f(y)$  и  $f(z)$  представляют собой плотности вероятности нормально распределенных случайных величин со своими стандартными отклонениями и математическими ожиданиями, равными ( $u_x t$ ) для  $f(x)$  и нулю для двух остальных. При нахождении источника на поверхности земли ( $z = 0$ )  $f(z)$  становится уже удвоенной плотностью вероятности случайной величины  $z$ , подчиняющейся усеченному нормальному закону, так как в этом случае эта функция существует лишь для положительных значений своего аргумента, что приводит к удвоению концентрации вредного вещества из-за его отражения земной поверхностью.

Что касается входящих в выражения (14.27)–(14.29) дисперсий  $\sigma_{(i)}^2$ , то их компоненты зависят от времени и проекции скорости  $U$  на декартовы оси:

$$\sigma_{(i)}^2(U, t) = \sigma_{(i)}^2(u_x t) + \sigma_0^2, \quad i = x, y, z, \quad (14.30)$$



где  $\sigma_{(i)}^2(u_x t)$  — функции, отражающие возрастание дисперсии по мере удаления центра соответствующего облака от источника выброса в направлении оси  $X$ ;  $\sigma_0^2$  — поправка, вводимая для исключения стремления функции  $c(r, t)$  к бесконечности при  $\sigma_{(i)}^2(u_x t = 0) = 0$ , т.е. в непосредственной близости от источника, и численно равная следующему значению:

$$\sigma_0^2 = [M / (2^{1/2} \pi^{3/2} \rho)]^{2/3}, \quad (14.31)$$

где  $\rho$  — плотность вредного газо- или парообразного вещества [10].

Так как непрерывно меняющаяся турбулентность и неоднородность приземных слоев атмосферы исключают точный теоретический вывод зависимости (14.30), которая была бы пригодной для всех территорий и климатических условий, то ее рекомендуется представлять различными эмпирическими выражениями. При этом считается, что наиболее полно учитывают влияние несущей среды, подстилающей ее поверхности и удаления  $x$  от источника вредного выброса следующие полуэмпирические выражения двух компонентов дисперсии:

а) для горизонтально-поперечного направления относительно оси  $X$

$$\sigma_y(x) = \alpha_2 x (1 + 4 \cdot 10^{-4} x)^{1/2}; \quad (14.32)$$

б) для вертикально-перпендикулярного направления относительно оси  $X$

$$\sigma_z(x) = \begin{cases} \varphi(x, z_0) \theta(x), & \varphi(x, z_0) \theta(x) \leq \sigma_z^{\max}(x); \\ \sigma_z^{\max}(x), & \varphi(x, z_0) \theta(x) > \sigma_z^{\max}(x), \end{cases}$$

$$\theta(x) = A_1 x^{B_1} / (1 + A_2 x^{B_2});$$

$$\varphi(x, z_0) = \begin{cases} \ln\{C_1 x^{D_1} [1 + (C_2 x^{D_2})^{-1}]\}, & z_0 \geq 0,1 \text{ м}; \\ \ln[C_1 x^{D_1} / (1 + C_2 x^{D_2})], & z_0 < 0,1 \text{ м}, \end{cases} \quad (14.33)$$

где  $\alpha_2$  — коэффициент, определяемый по табл. 14.4 с учетом класса вертикальной устойчивости атмосферы и типа местности;  $\sigma_z^{\max}$  — максимально возможное значение компонента стандартного отклонения в вертикальном направлении;  $A_1, A_2, B_1, B_2$  — коэффициенты, зависящие от класса устойчивости атмосферы (см. табл. 13.1);  $C_1, C_2, D_1, D_2$  — коэффициенты, учитывающие трение облака вредного вещества о шероховатость подстилающей поверхности;  $z_0$  — высота ее предметов, зависящая от характера соответствующей местности.

Значения перечисленных выше и других коэффициентов, зависящих от класса вертикальной устойчивости атмосферы, приведены в табл. 14.4, а от шероховатости подстилающей поверхности — в табл. 14.5.

Таблица 14.4. Эмпирические коэффициенты для оценки параметров дисперсии

Класс устойчивости	$\alpha_2$	$\sigma_2^{\max}$	$A_1$	$A_2$	$B_1$	$B_2$	$\chi$
A	0,22/0,32	1600	0,112	0,000538	1,060	0,815	0,1
B	0,16/0,32	920	0,130	0,000652	0,950	0,750	0,5
C	0,11/0,22	640	0,112	0,000905	0,920	0,718	1,5
D	0,08/0,16	400	0,098	0,001350	0,889	0,688	6,0
E	0,06/0,11	220	0,0609	0,001960	0,895	0,684	19,0
F	0,04/0,11	100	0,0638	0,001360	0,783	0,672	65,0

Примечания. 1. Значения  $\alpha_2$  в числителе — для ровной сельской местности при  $z_0 = 0,03$  м, а в знаменателе — для городской застройки или лесистой местности при  $z_0 = 1$  м. 2. Коэффициент  $\chi$ , устанавливающий соотношения между  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$ , будет использован и пояснен ниже — в комментарии к формуле (14.39).

Таблица 14.5. Параметр шероховатости  $z_0$  и коэффициенты  $C_1, C_2, D_1, D_2$

Тип поверхности	$z_0$ , м	$C_1$	$C_2$	$D_1$	$D_2$
Ровная, высокая трава ( $u_x = 1$ м/с)	0,01	1,56	0,000675	0,048	0,45
Ровная, высокая трава ( $u_x = 7$ м/с)	0,04	2,02	0,000776	0,0269	0,37
Местность, покрытая кустарником	0,1	2,72	0	0	0
Лес, средняя высота деревьев = 10 м	1	7,37	0,00429	-0,096	-0,6
Город, высота зданий около 25 м	4	11,7	0,0459	-0,128	-0,78

В завершение параграфа отметим, что помимо только что приведенного способа учета рассеяния вредного вещества в его облаке (с помощью стандартных отклонений  $\sigma_x(u_x t)$ ,  $\sigma_y(u_x t)$ ,  $\sigma_z(u_x t)$  его частиц) известны и другие методики определения данного эффекта и его учета при прогнозировании образуемых при этом полей концентрации. Об их основных отличиях и сферах предпочтительного использования будет сказано в следующем параграфе.

## 14.4. Обобщенный подход к прогнозированию параметров распространения и рассеяния вредного вещества

Наиболее распространенным ныне способом прогноза параметров распространения и рассеяния вредных веществ является математическое моделирование, а основными моделями — гауссовы параметрические формулы (14.27)—(14.29) и интегральные модели, основанные на системе дифференциальных уравнений типа (14.22)—(14.26). При

этом первые являются более простыми, а их использование обычно основано на следующих допущениях и ограничениях:

- а) стационарность метеоусловий от начала вредного выброса до спада уровня концентрации ниже порогового значения;
- б) малая пересеченность рельефа подстилающей поверхности;
- в) предпочтительность прогноза концентрации на удалениях от 0,1 до 10 км от источника загрязнения, где направление движения несущей среды считается неизменным.

В общем случае прогнозирования положения частиц вредного вещества в пространстве рекомендуется следующая полуэмпирическая диффузионная модель турбулентности [10]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(u_i c)}{\partial r_i} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial r_i} \left( K_i \frac{\partial c}{\partial r_i} \right) + \Pi(c) = S(r, t), \quad (14.34)$$

где  $c$  — концентрация вредного вещества в момент времени  $t$  в точке  $r$  с координатами  $(x, y, z)$ ;  $K_i, u_i$  — коэффициент турбулентного обмена частиц вещества с атмосферой и скорость их движения вдоль  $i$ -й координатной оси в данной точке;  $\Pi(c)$  — интенсивность убыли вещества за счет химических и фазовых превращений;  $S(r, t)$  — функция источника выбросов, учитывающая повышение концентрации вредного вещества в атмосфере вследствие ее подпитки.

Решение этого дифференциального уравнения в частных производных для времени  $\tau = t - t_0$  от начала залпового выброса количества  $M$  вредного вещества из точки  $r'(x', y', z')$ , с учетом нулевых начальных условий и допущений:  $x, y \rightarrow \infty$ ;  $K_i, u_i = \text{const}$ ;  $\Pi(c) = S(r, t) = 0$  имеет вид

$$c(r, \tau) = \frac{M}{8\pi\tau^{3/2} \sqrt{K_x K_y K_z}} \exp\left(-\sum_{i=1}^3 \frac{(r_i - r'_i - u_i \tau)^2}{4K_i \tau}\right); \quad r_i = x, y, z, \quad (14.35)$$

где  $r, r'$  — координаты точек  $(x, y, z)$  трехмерного поля концентрации вредного вещества и мгновенного источника его выброса в момент времени  $t_0 = 0$ .

Обратим внимание на качественное сходство только что приведенного результата решения модели (14.34) с полученным выше решением в виде системы (14.27), (14.28): оба они получены при равенстве нулю функций  $\Pi(c)$ ,  $S(r, t)$ ,  $f_p(t)$  и  $f_{oc}(t)$ , а роль прежних стандартных отклонений  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $\sigma_z$  здесь выполняют коэффициенты турбулентного обмена  $K_x, K_y$  и  $K_z$ . При этом две группы данных параметров рассеяния однозначно связаны между собой следующими соотношениями:  $K_i = (1/2)d\sigma_i^2(t)/dt$  и  $\sigma_i^2(t) = 2K_i t$  при  $K_i \rightarrow \text{const}$ . Кроме того, параметры рассеяния  $K_i, \sigma_i$  имеют еще два сходства: а) зависят от свойств среды и степени ее возмущения источником вредных выбросов; б) изменя-

ются с удалением от места их выброса и с ростом времени  $\tau = t - t_0$ . Однако при малом времени  $\sigma_i^2 \sim \tau^2$  и  $K_i \sim \tau$ , а при большом —  $\sigma_i \sim \tau$  и  $K_i \rightarrow \text{const}$ .

При последующем оценивании коэффициентов  $K_i$ ,  $i = x, y, z$ , ниже будут учтены следующие три различные ситуации:

- 1) атмосфера считается невозмущенной;
- 2) она подвергнута воздействию мощной струи газа с плотностью меньшей, чем у воздуха;
- 3) атмосфера «возмущена» выбросом большого количества тяжелых газов.

В первом случае рассчитывать значение  $K_z$  обычно рекомендуется по формулам

$$K_z = k_K u_* z / \varphi_a; \quad U_* = (\tau_{\text{тр}} / \rho_a)^{1/2};$$

$$\varphi_a = \begin{cases} 1 - 16(z/L_{\text{МО}})^{-0,25}, & L_{\text{МО}} < 0; \\ 1 + 5z/L_{\text{МО}}, & L_{\text{МО}} > 0, \end{cases} \quad (14.36)$$

где  $k_K$  — постоянная Кармана, равная для этих условий  $0,4 \pm 0,4$ ;  $U_*$  — динамическая скорость (мера интенсивности диффузии), м/с;  $z$  — высота относительно подстилающей поверхности, м;  $\rho_a$  — плотность невозмущенной атмосферы (несущей среды), кг/м<sup>3</sup>;  $\tau_{\text{тр}}$  — напряжение трения в подстилающей поверхности, зависящее от ее шероховатости, Па;  $L_{\text{МО}}$  — характерный масштаб длины Монина—Обухова, определяемый для приземного слоя по зависимости

$$L_{\text{МО}} = u_*^3 / \{k_K g / T_0 - q_t / (C_p \rho_a)\}, \quad (14.37)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $T_0$  — средняя температура воздуха в слое высотой до 10 м, °С;  $C_p$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/(кг·К);  $q_t$  — интенсивность турбулентного потока тепла от подстилающей поверхности, кДж/(м<sup>2</sup>·с).

Во втором случае (атмосфера возмущена струей легкого газа) оценку коэффициента  $K_i = K_T$  турбулентного обмена целесообразно проводить исходя из его зависимости от скорости  $V_{\text{тр}}$  турбулентных пульсаций и характерного масштаба возмущающей струи  $b = u_{x_0}(z_c - z_0) / U_0$ , где  $U_0 = (u_{x_0}^2 + u_{z_0}^2)^{1/2}$  — модуль вектора скорости истечения струи легкого вредного газа (индекс 0), найденный по его горизонтальной  $u_x$  и вертикальной  $u_z$  составляющим;  $z_0, z_c$  — координаты точек струи, совпадающих с ее осью и внешней верхней частью. Данную зависимость часто выражают следующими математическими выражениями:

$$K_T = \zeta_c b (\rho / \rho_a)^{0,75} V_{\text{тр}};$$

$$V_{\text{тр}} = 0,08 + |0,5g u_z (\rho_a / \rho - 1) / U^3| (|U^2 - u_x U_a| + 4,5 |u_z U_a / U^2|), \quad (14.38)$$

где  $\zeta_c$  — коэффициент, зависящий от формы струи (для круга  $\zeta_c = 0,3$ );  $\rho, \rho_a$  — плотности истекающего газа и невозмущенной атмосферы в нормальных условиях,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  — ускорение свободного падения;  $U, U_a$  — скорости струи и движения невозмущенной атмосферы,  $\text{м/с}$ .

В третьем случае (рассеяние тяжелого газа) связанные между собой коэффициенты турбулентного обмена  $K_i$  определяются с помощью следующих выражений, учитывающих влияние параметров состояния и термогазодинамического возмущения несущей среды:

$$K_x = K_y = \chi K_z; K_z = k_K u_* z / [(0,88 + 0,099 Ri_*^{1,04})(1 + \delta)];$$

$$Ri_* = (\rho - \rho_a) g h_{\text{eff}} / (\rho_a u_*^2); h_{\text{eff}} = \frac{1}{C_0} \int_0^{\infty} C dz, \quad (14.39)$$

где  $\chi$  — безразмерный множитель, определяемый с помощью табл. 14.4 для разных классов устойчивости атмосферы (см. табл. 13.1);  $k_K$  — постоянная Кармана;  $Ri_*$  — массовое число Ричардсона, зависящее от вертикальной устойчивости атмосферы;  $h_{\text{eff}}$  — эффективная высота клуба вредного облака,  $\text{м}$ ;  $\delta$  — показатель степенного закона изменения скорости ветра по высоте;  $C_0, C$  — значения концентрации вредного вещества в центре струи и на конкретной высоте,  $\text{кг/м}^3$ .

Как показывает анализ последних выражений, сложнее всего рассчитать эффективную высоту  $h_{\text{eff}}$ , введенную для согласования теории с экспериментом. Поэтому данный параметр фигурирует лишь в системах дифференциальных уравнений типа (14.18) — (14.21), где он используется для раскрытия компонента вектора скорости  $\vec{W}$  в направлении оси  $Z$ . Однако эта модель при рассеянии рассматриваемых здесь тяжелых газов может быть использована лишь путем численного интегрирования.

Учитывая трудоемкость определения дисперсии  $\sigma_{(i)}^2(u, t)$  и коэффициентов турбулентного обмена  $K_{(i)}(u, t)$ , укажем способ их упрощенной оценки, основанный на аппроксимации зависимостей (14.30) — (14.32). Дело в том, что при известных классе устойчивости атмосферы и шероховатости подстилающей поверхности эти параметры являются функциями одного параметра:  $\sigma_i$  — расстояния  $x$ ,  $\text{м}$ , до источника выбросов вредного вещества,  $K_i$  — скорости ветра  $V$ ,  $\text{м/с}$ , в приземном слое. С учетом этого можно применять формулы

$$K_x = K_y = \psi_{1,2} V; K_z = \psi_3 V; \sigma_i = a_i x (1 + b_i x)^{c_i}, \quad (14.41)$$

где  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  и  $a_i, b_i, c_i$  — константы из табл. Г.2 и Г.3 из приложения к этой книге.

Сопоставление результатов оценки коэффициентов турбулентной диффузии  $K_i$ , рассчитанных с помощью коэффициентов  $\psi_i$ , ука-

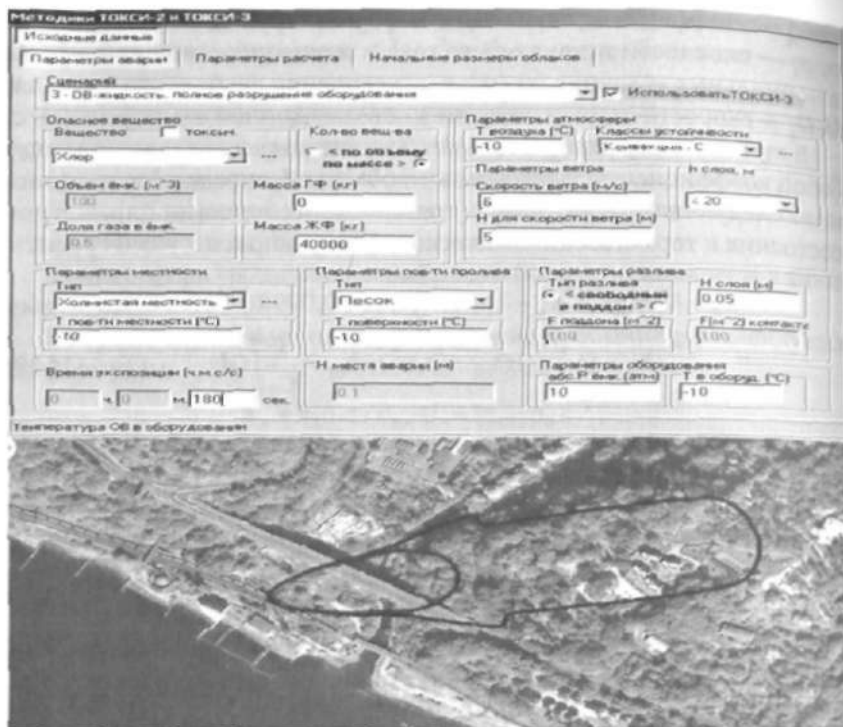


Рис. 14.2. Интерфейс «Токси + Risk» с исходными данными и полем концентрации

зывает на их определенное совпадение, особенно при расположении источника вредных выбросов в сельской местности, т.е. при относительно малой шероховатости подстилающей поверхности. Данный факт свидетельствует о возможности применения упрощенного способа оценки  $K_f$  при моделировании их турбулентного рассеяния; при этом погрешность не превышает ту, которая обеспечивается официальными методиками.

А вот снижение трудоемкости прогнозирования полей концентрации с помощью моделей (14.22) — (14.28) возможно с помощью программного комплекса «Токси + Risk», что подтверждено его двумя интерфейсами, которые представлены на рис. 14.2.

Верхняя часть этого рисунка содержит исходные данные о жидком вредном веществе и метеоусловиях в районе его аварийного пролива, а нижняя — две изолинии разной концентрации продуктов испарения этой жидкости на конкретный момент времени. Если точнее, то речь идет о железнодорожной цистерне с жидким хлором, которая оказалась разрушенной в результате крушения поезда (см. параграф 11.5), произошедшего на прибрежном участке железнодорожного пути при ветре со стороны моря (левый нижний угол рис. 14.2).

Более подробные сведения о содержании имеющейся на рис. 14.2 информации и возможностях данного программного комплекса изложены в приложении Е.3 к настоящей книге. Нетрудно догадаться, что применение подобных технических средств и результатов не только заметно упрощает и повышает оперативность прогноза техногенного риска, но также позволяет его картографировать почти в реальном масштабе времени, что удобно для оперативного оповещения людей. Соответствующие иллюстрации будут приведены в следующей главе.

## 14.5. Прогнозирование пятен и полей концентрации вредного вещества

Проиллюстрируем конструктивность применения модели (14.27), (14.28) путем априорной оценки параметров зон заражения типа (I) «клуб облака» и (II) «пятно загрязнения», понимая под ними соответственно геометрическое место точек  $c(x, y, z, t)$  и  $c(x, y, z = 1,5 \text{ м}, t)$ , внутри которых текущая концентрация вредного вещества превышает некоторое значение  $c^*$ . Эти зоны отличает лишь то, что клуб представляет собой объемное образование, а пятно — его сечение, параллельное поверхности земли и приподнятое над ней на высоту  $z = 1,5 \text{ м}$ .

При прогнозе геометрии клуба облака учтем три разных положения источника залповых вредных выбросов относительно подстилающей поверхности: а) наземное ( $z = 0$ ), б) очень высокое ( $z \rightarrow \infty$ ), в) промежуточное ( $0 < z < \infty$ ). Для первого (а) случая после замены в уравнении (14.27) всех сомножителей на выражения (14.28) и приравнивания  $z = 0$ , а  $c(x, y, z, t = t^*) = c^*$  можно показать [10], что геометрическая форма клуба облака представляет собой полуэллипсоид с центром в точке  $r_1(u_x t^*; 0; 0)$  и длиной главных полуосей  $a_{x1}(t^*)$ ,  $a_{y1}(t^*)$  и  $a_{z1}(t^*)$ , определяемых следующими математическими выражениями:

$$a_{i1}^2(t^*) = 2\sigma_{(i)}^2(u_x t^*) \ln(d_1(t^*)), \quad i = x, y, z;$$

$$d_1(t^*) = \frac{2Mf_p(t^*)f_{oc}(t^*)}{c^*(2\pi)^{3/2}\sigma_x(u_x t^*)\sigma_y(u_x t^*)\sigma_z(u_x t^*)}. \quad (14.42)$$

Аналогичным образом могут быть получены математические соотношения для поверхности клуба облака во втором (б) случае, где оно уже будет иметь форму полного эллипсоида с центром в точке  $r_2(u_x t^*; 0; z)$  и длиной главных полуосей  $a_{x2}(t^*)$ ,  $a_{y2}(t^*)$  и  $a_{z2}(t^*)$ . Эти параметры также определяются по зависимостям (14.42), с тем отличием, что в числителе выражения для  $d_2(t^*)$  на сей раз будет отсутствовать множитель 2, т.е.  $d_2(t^*) = d_1(t^*)/2$ , тогда как  $a_{i2}(t^*) = a_{i1}(t^*)$ .

Заметно сложнее обстоит дело в наиболее общем (в) случае, что обусловлено удвоенностью плотности  $f(z)$  концентрации вредного вещества вдоль оси  $z$ , а также ее подчиненностью закону усеченного нормального распределения. Получив общее выражение для поверхности клуба облака (подобно первому случаю) и исследовав изолинии, образуемые ортогональными осям  $X, Y, Z$  плоскостями, можно прийти к довольно интересным результатам.

Оказывается, что при  $0 < z < \infty$  поверхность клуба имеет более сложную (чем эллипсоид) форму, сечение которой горизонтальными плоскостями дает изолинии в форме эллипсов с центрами в точках  $(u_x t^*; 0)$  и длинами полуосей  $a_{x_3}(t^*), a_{y_3}(t^*)$ . С увеличением же  $z$  относительно сечения максимальных размеров длины обеих полуосей монотонно и пропорционально уменьшаются, вплоть до их обнуления на некоторой высоте  $z_3$ , т.е. при  $z = z_3$  эллипс вырождается в точку. А вот при движении от сечения максимальной площади вниз его полуоси некоторое время сокращаются, при этом скорости  $da_{x_3}(t^*)/dz$  и  $da_{y_3}(t^*)/dz$  постепенно уменьшаются до нуля, после чего длина полуосей остается неизменной.

Несколько другие результаты получаются при сечении клуба облака плоскостью, перпендикулярной оси  $X$ . В данном случае для соответствующей изолинии могут быть получены следующие математические соотношения [10]:

$$y = \pm a_y(z, t^*) \sqrt{1 - \frac{(x_p - u_x t^*)^2}{a_x^2(z, t^*)}}, \quad \left| \frac{x_p - u_x t^*}{a_x(z, t^*)} \right| \leq 1. \quad (14.43)$$

Выражения, подобные данному, справедливы и для ортогональных оси  $Y$  сечений клуба облака, с той разницей, что числители каждой из этих двух формул лишаются вычитаемых  $(u_x t^*)$ , а выражение изолинии  $x$  отличается от уравнения для  $y$  этой системы тем, что имеет дополнительное слагаемое  $u_x t^*$ , расположенное перед знаком « $\pm$ ».

Приведенные выше результаты прогноза параметров зон загрязнения проиллюстрированы на рис. 14.3 для всех трех случаев. Так, в его левой (а) части изображены два клуба облака: внизу — соответствующий залповому выбросу вредного вещества из наземного источника ( $z = 0$ ), а сверху — при его очень высоком расположении ( $z \rightarrow \infty$ ). В средней (б) части этого рисунка показано облако, формируемое при промежуточном расположении источника и похожее на электрическую лампочку. А вот изолинии пороговой концентрации вредного вещества, образуемые сечением подобного облака плоскостями разной ориентации, представлены следующим образом: горизонтальная — четырьмя эллипсами в центре; ортогональная осям  $X$  и  $Y$  — двумя кривыми в прямоугольниках его правой (в) части.



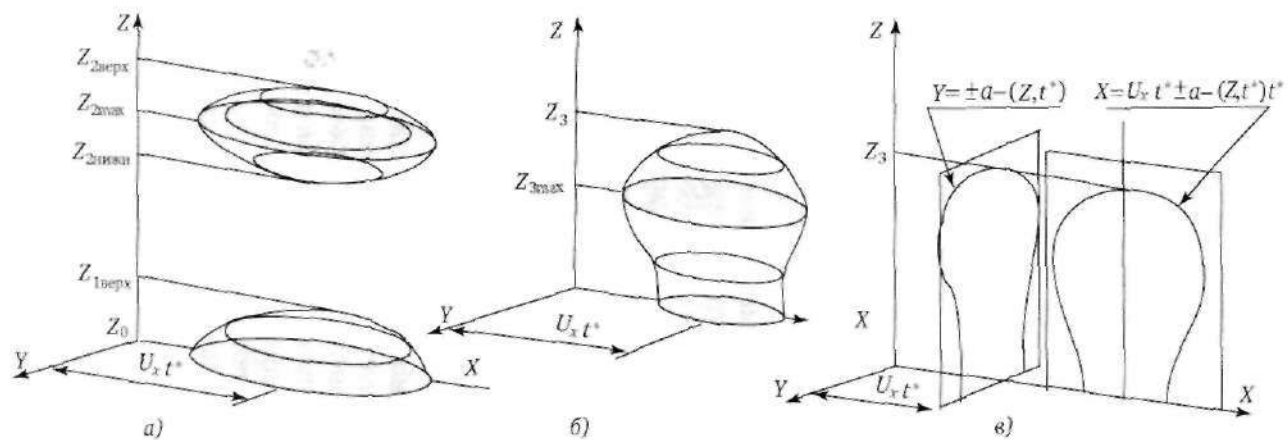


Рис. 14.3. Иллюстрация геометрии клуба облака вредного вещества:

$a$  — наземное (внизу) и очень высокое (вверху) положение;  $b$  — промежуточное положение;  $c$  — изолинии пороговой концентрации

Следующая задача (II) связана с прогнозированием геометрии пятна загрязнения, порождаемого залповым выбросом вредного вещества. Актуальность его оценки обусловлена расположением пятна на уровне органов дыхания человека ( $z = 1,5$  м), поэтому для его определения можно воспользоваться изложенными выше результатами. В частности, замена в системе уравнений (14.27), (14.28) функции  $c(x, y, 1,5)$  на величину  $c^*$  с учетом  $0 < z < \infty$  может дать [10] аналитическое выражение изоплеты (контурной линии) искомого пятна. При этом полуоси соответствующего эллипса определяются следующими формулами:

$$a_i^2(1,5, t^*) = 2\sigma_i^2(u_x t^*) \ln(d(1,5, t)), \quad i = x, y;$$

$$d(1,5, t^*) = \exp\left(\frac{(1,5 - z_0)^2}{2\sigma_z^2(u_x t^*)}\right) \cdot \left[1 + \exp\left(-\frac{3 \cdot z_0}{2\sigma_z^2(u_x t^*)}\right)\right] \cdot d_2(t^*), \quad (14.44)$$

где  $d_2(t^*) = d_1(t^*)/2$  — параметр, рассчитываемый по второй формуле системы уравнений (14.42).

Как ясно из приведенных математических соотношений, положение центра эллиптического пятна загрязнения соответствует координатам  $(u_x t^*; 0; 1,5$  м), а размеры его полуосей равны  $a_x(1,5 t^*)$  и  $a_y(1,5 t^*)$ , т.е. зависят от времени превышения концентрацией вредного вещества ее порогового значения  $c^*$ . Кроме того, после приравнивания правой части второго уравнения системы (14.44) единице и подстановки в него выражения для  $d_2(t^*)$  из формулы (14.42) можно показать, что существуют два момента времени, один из которых связан с зарождением исследуемого пятна, а другой — с его исчезновением.

Иначе говоря, логично утверждать о следующей динамике токсонагрузки, вызванной аварийным выбросом вредного вещества. Начиная с момента времени  $t_n^*$  концентрация  $c(r, t)$  поднимается до порогового значения, что соответствует началу образования пятна загрязнения и росту его площади. Достигнув же максимальной величины, она затем начинает уменьшаться, вплоть до вырождения пятна в точку в момент времени  $t_k^*$ . Началу и концу его образования соответствуют удаления  $x_n^* = u_x t_n^*$  и  $x_k^* = u_x t_k^*$  от источника выброса.

Подобное изменение размеров эллипсоидного пятна загрязнения объясняется монотонно возрастающей зависимостью параметров  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$ ,  $\sigma_z^2$  от времени по причине турбулентности несущей среды с сопутствующими этому противоречивыми тенденциями. С одной стороны, турбулентное рассеяние вредного вещества приводит к росту размеров пятна загрязнения, с другой — его количество внутри пятна постепенно истощается, так как загрязнитель постепенно «выветривается» за его пределы. В итоге размеры изоплеты пятна вначале растут, а затем уменьшаются, что и проиллюстрировано на рис. 14.4.

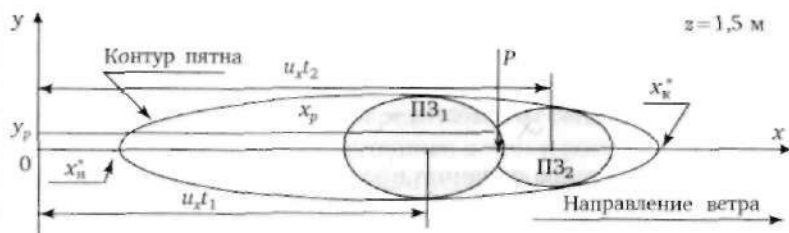


Рис. 14.4. Механизм образования пятна загрязнения в форме эллипса

На этом завершим демонстрацию работоспособности рассмотренных методов прогнозирования геометрии зон неуправляемого распространения энергии и вредного вещества. Однако для априорной оценки площадей вероятного и достоверного повреждения конкретных объектов необходимо знать не только их размеры, но и пространственно-временные характеристики действующих поражающих факторов. Уяснению соответствующих параметров как раз и посвящен материал следующего параграфа данной главы.

## 14.6. Особенности прогнозирования параметров полей концентрации в наиболее типичных ситуациях

С учетом изложенных выше соображений и в предположении о совпадении направления ветра с осью  $X$ , координат источника залпового выброса — с точкой  $r' = (x'; y'; z')$ , а его времени — с моментом  $t = 0$ , математическая модель поля концентрации  $c(r, t)$  принимает вид, аналогичный приведенным ранее выражениям (14.27) и (14.28):

$$c(r, t) = Mf(x, x', t)f(y, y', t)f(z, z', t)f_p(t)f_{oc}(t). \quad (14.45)$$

Однако его три функции не совпадают с соотношениями (14.28), так как здесь они уже следующие:

$$f(x, x', t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x(u_x t)} \exp\left(-\frac{(x - x' - u_x t)^2}{2\sigma_x^2(u_x t)}\right);$$

$$f(y, y', t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(u_x t)} \exp\left(-\frac{(y - y')^2}{2\sigma_y^2(u_x t)}\right);$$

$$f(z, z', t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z(u_x t)} \left[ \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2(u_x t)}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z_0)^2}{2\sigma_z^2(u_x t)}\right) \right]. \quad (14.46)$$

Этот довольно общий результат позволяет применить модель мгновенного выброса для прогноза полей концентрации в других практи-

чески важных ситуациях. Последовательно проиллюстрируем подобную возможность на примере учета особенностей вначале геометрии источника вредного выброса, а затем и динамики его «работы»; причем сделаем это двумя способами — точным и приближенным, начиная с первого.

Для поиска точного решения предположим вначале, что источник представляет собой не точку, а расположенный вдоль оси  $X$  отрезок прямой, начало и конец которого соответствуют координатам  $(x_1; y'; z')$ ,  $(x_2; y'; z')$  при  $x_2 > x_1$ , а интенсивность  $q$  выброса из него вредного вещества неизменна во времени, т.е.  $q = \text{const}$ . В данном случае модель концентрационного поля уже выражается формулой [10]  $c(r, t) = qI_1(x, t)f(y, y', t)f(z, z', t)f_1(t)f_{\infty}(t)$ , первая функция-сомножитель которой есть определенный интеграл от функции  $f(x, x', t)$ :

$$I_1(x, t) = \int_{x_1}^{x_2} f_1(x, x', t) dx' = \frac{1}{2} \left[ \Phi \left( \frac{x - x_1 - u_x t}{\sqrt{2\sigma_x(u_x t)}} \right) - \Phi \left( \frac{x - x_2 - u_x t}{\sqrt{2\sigma_x(u_x t)}} \right) \right], \quad (14.47)$$

где  $\Phi(*)$  — функция Лапласа, описывающая стандартную нормально распределенную случайную величину и называемая эрфик-функцией (см. табл. Г.4 приложения).

Аналогичным образом получается математическая модель поля концентрации при условии, что источник представляет собой уже плоскость, образуемую семейством отрезков прямых, перпендикулярных оси  $X$ . В этом случае интегрированию подвергаются две функции  $f(y, y', t)$  и  $f(z, z', t)$ , в результате чего можно получить следующие выражения:

$$I_2(y, t) = \int_{y_1}^{y_2} f(y, y', t) dy' = \frac{1}{2} \left[ \Phi \left( \frac{y - y_1}{\sqrt{2\sigma_y(u_x t)}} \right) - \Phi \left( \frac{y - y_2}{\sqrt{2\sigma_y(u_x t)}} \right) \right];$$

$$I_3(z, t) = \int_{z_1}^{z_2} f(z, z', t) dz' = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left( \frac{z - z_1}{\sqrt{2\sigma_z(u_x t)}} \right) - \Phi \left( \frac{z - z_2}{\sqrt{2\sigma_z(u_x t)}} \right) + \Phi \left[ \frac{z + z_2}{\sqrt{2\sigma_z(u_x t)}} \right] - \Phi \left( \frac{z + z_1}{\sqrt{2\sigma_z(u_x t)}} \right) \right\}. \quad (14.48)$$

Подобным способом могут быть получены точные аналитические модели полей концентрации  $c(r, t)$ , формируемых источником вредных выбросов в форме объема или поверхности любой конфигурации. Для этого данный источник нужно представлять множеством точек с равномерной объемной или поверхностной плотностью эмиссии вещества. Некоторые из таких уравнений, полученных из фундаментального решения (14.35), можно найти в работе [10].

Демонстрацию второй возможности *приближенного* учета специфических особенностей геометрии источника вредных выбросов проведем заменой его пространственных конфигураций на точечные. Достигнуть этого можно одновременным переносом модифицированного подобным образом источника в точку, расположенную левее и сбоку относительно центра, при условии что движение несущей среды совпадает с осью  $X$ .

Проиллюстрируем суть подобной «подмены» на примере источника в форме трехмерного параллелепипеда с ортогональными координатным осям гранями длиной  $2L_x$ ,  $2L_y$ ,  $2L_z$  и центром в точке  $(0; 0; z_0)$ . По своей сути данная задача в этом случае сводится к нахождению такого расположения фиктивного источника на линии, проходящей через центр этого параллелепипеда и параллельно оси  $X$ , которое обеспечит эквивалентное реальному источнику пятно загрязнения в вертикальной плоскости при  $x = 0$ . Иначе говоря, струя от точечного источника в сечении  $x = L_x$  должна иметь ширину, равную  $2L_y$ .

Оказывается, что достигнуть искомого положения можно тремя перемещениями модифицированного источника во всех трех плоскостях, направление и величина каждого из которых —  $\Delta x_{xy}$ ,  $\Delta x_{xz}$  и  $\Delta x_{xx}$  — определяются следующими уравнениями:

$$\sigma_y(\Delta x_{xy}) = L_y / 2,15; \quad \sigma_z(\Delta x_{xz}) = L_z / 2,15; \quad \sigma_x(\Delta x_{xx}) = L_x / 2,15. \quad (14.49)$$

Это означает, что для перехода от модели точечного источника к его модели в виде параллелепипеда можно использовать соотношения (14.45) и (14.46), при условии замены имеющихся там стандартных отклонений на следующие более адекватные такой подмене величины:  $\sigma_x(u_x t + \Delta x_{xx})$ ,  $\sigma_y(u_x t + \Delta x_{xy})$ ,  $\sigma_z(u_x t + \Delta x_{xz})$ .

Что касается демонстрации последней (из заявленных ранее) особенности — возможности учета разной *динамики* работы источника вредных выбросов, то и эта задача может быть решена модификацией выбранной выше базовой модели. В частности, поле концентрации  $c(r, t)$ , формируемое кратковременными импульсными выбросами постоянной интенсивности, легко построить с помощью выражения (14.45), при условии что в момент времени  $t'$  вносится единичная масса вредного вещества, т.е.  $M = 1$ .

Если же эпизодические выбросы наблюдаются в течение интервала  $(0; T)$ , то при построении концентрационного поля нужно пользоваться двумя аналитическими выражениями: для периода  $0 < t < T$  его кратковременной «подпитки» вредным веществом и после этого периода ( $t \geq T$ ). Данное обстоятельство накладывает дополнительные ограничения, что будет продемонстрировано ниже (см. параграф 15.4) при прогнозе полученных людьми токсодоз.

На этом завершим иллюстрацию конструктивности применения гауссовых моделей для оперативного оценивания полей концентрации вредного вещества и выдадим ряд обобщенных рекомендаций, касающихся наиболее предпочтительного практического применения не только различных способов оценки самых значимых параметров  $K_i(u_i t)$  и  $\sigma_i(u_i t)$ , но и оперирующих ими моделей (14.27), (14.28) и (14.22) — (14.26).

1. Для повышения точности прогнозирования  $c(r, t)$  в режиме реального времени целесообразно использовать обе зависимости  $K_i(u_i t)$  и  $\sigma_i(u_i t)$ , отдавая предпочтение:

а) формуле (14.32) — для оценки дисперсии  $\sigma_y^2(u_x t)$ , т.е. в направлении, перпендикулярном скорости ветра и параллельном подстилающей поверхности;

б) выражению (14.33) — для дисперсии в вертикальном направлении  $\sigma_z^2(u_z t)$ .

2. Наибольшая достоверность при применении этих формул достигается на удалениях от источника выброса в пределах от 0,1 до 10 км, а при расстояниях, меньших 100 м, следует интерполировать значения  $\sigma_i(u_i t)$ , используя их линейную зависимость от  $x = u_x t$ .

3. Для приближенных расчетов можно использовать упрощенные зависимости типа (14.41), а для особо точных — имеющиеся в работе [10] более строгие выражения для стандартных отклонений, учитывающие поправки на время осреднения.

4. Определение коэффициентов  $K_i(u_i t)$  турбулентного обмена по громоздким формулам (14.36) — (14.40) нужно совмещать с процедурой численного моделирования системы (14.18) — (14.22) или находить приближенные значения  $K_i(u_i t)$  с помощью  $\sigma_i(u_i t)$  — путем пересчета по соотношению  $2K_i t = \sigma_i(u_i t)$  для  $K_i = \text{const}$ .

5. Применение гауссовых моделей (14.27), (14.28) и основанной на них компьютерной программы «Токси-2» из комплекса «Токси + Risk» обеспечивает приемлемую точность лишь для прогноза параметров распространения в атмосфере сравнительно легких вредных веществ.

6. Для аварийных и непрерывных вредных выбросов аэрозолей, а также вредных газообразных веществ с плотностью, равной и превышающей атмосферную, более достоверные результаты дают модели типа (14.22) — (14.26) и программа «Токси-3», имеющаяся в упомянутом выше автоматизированном комплексе.

На этом ограничимся в рассмотрении способов определения параметров рассеяния  $K_i(u_i t)$  и  $\sigma_i(u_i t)$  в установленном режиме и обратим внимание на особенности оценки нестационарного поля концентрации. Оказывается, что в данной ситуации может быть использован опыт, накопленный при построении полей концентрации газо- и мелкодисперсных выбросов из непрерывно действующего их точечного источника на ОПО при условии модификации рассмотренных выше

дисперсионных зависимостей. Легче всего это сделать, заменив в формулах (14.32), (14.33) аргумент  $x_i$  на  $u_i t$  и вдвое уменьшив дисперсию  $\sigma_y(u_i t)$ .

Отметим также те недостатки моделей типа (14.27), (14.28) и (14.45), (14.46), которые обусловлены игнорированием следующих факторов:

а) влияния на параметры несущей среды продуктов мощного мгновенного выброса, характеризующегося высокой плотностью и скоростью вредного вещества;

б) наличия в атмосфере слоев с разной температурой и плотностью, сильно меняющих интенсивность диффузионного обмена с продуктами выброса.

Вот почему рассмотренные здесь параметрические модели целесообразно использовать лишь при соблюдении условий, которые будут обсуждены ниже (см. параграф 15.2). В противном случае можно получить необоснованно завышенные или заниженные прогнозы  $c(x, t)$ . Последнее будет иметь место, например, из-за раздвоения облака паров сжиженного тяжелого газа под воздействием мощных нисходящих потоков в центре его большого пролива и таких же, но уже — в обратном направлении и по периметру зоны его испарения. Дело в том, что подобные явления можно учесть лишь с помощью моделей (14.18) — (14.21) и программных комплексов численного моделирования типа PHOENIX.

Завершая же параграф и главу в целом, подчеркнем как бы подготовительный характер изложенного в ней материала, что обусловлено спецификой исследуемых до сих пор (начальных) этапов причинения техногенного ущерба. Вот почему примеры, иллюстрирующие работоспособность рассмотренных здесь моделей, а также методов прогнозирования параметров трансформации и разрушительного воздействия продуктов выброса, целесообразно привести после ознакомления со всеми этапами всего процесса, что и будет сделано в последней главе этого раздела данной монографии.

## Вопросы и задания для самопроверки

1. Каким требованиям к составу входных и выходных данных должны удовлетворять модели истечения и распространения потоков энергии и вещества?
2. Перечислите признаки классификации моделей истечения и распространения потоков энергии и вещества.
3. Укажите типичные недостатки официально рекомендуемых ныне методик прогноза параметров истечения и распространения вредных выбросов.

4. Какие типовые сценарии обычно рассматриваются при прогнозе количества аварийно высвободившегося вещества?
5. В чем состоят особенности высвобождения и распространения аварийных потоков большинства видов энергии?
6. Что означает аббревиатура «BLEVE», и для обозначения каких выбросов она применима?
7. Известны ли вам ограничения на оценку параметров взрыва с помощью параметрической формулы Садовского?
8. Дайте определение понятиям «клуб облака» и «пятно загрязнения».
9. Какими объемными и плоскими геометрическими фигурами обычно интерпретируются вредные зоны «клуб облака» и «пятно загрязнения»?
10. С помощью каких моделей и их параметров могут прогнозироваться контуры различных фигур облака и пятна?
11. Какие практически важные задачи могут быть решены с помощью математических соотношений, определяющих геометрию облака и пятна загрязнения?
12. Поясните динамику и физику процессов, связанных с зарождением и исчезновением клуба облака и пятна загрязнения.
13. В чем состоит достоинство моделирования и системного анализа процесса распространения вредных выбросов гауссовыми параметрическими моделями?
14. Каково соотношение между применяемыми в гауссовых параметрических моделях коэффициентами дисперсионного и турбулентного обмена?
15. Что означает термин «эрфик-функция», и где он используется?
16. Каким образом в гауссовых моделях могут быть учтены особенности геометрии источника выбросов и динамики его «работы»?
17. Укажите факторы, учитываемые при расчете коэффициентов дисперсионного и турбулентного обмена между вредным веществом и несущей его средой.
18. Сформулируйте условия наиболее предпочтительного применения параметрических моделей гауссова типа.
19. В каких случаях целесообразно использовать многопараметрические модели и основанные на них программные комплексы «Токси + Risk» и PHOENIX?
20. Известны ли вам упрощенные способы оценки входящих в многопараметрические модели коэффициентов дисперсионного и турбулентного обмена?

**Ситуационная задача.** Используя правую часть выражения (14.2), рассчитайте количество энергии, способной высвободиться при разрыве сосуда, находящегося в процессе гидроиспытаний, если его объем составляет 400 л, а величина давления, при котором проводится испытание, достигла к моменту разрыва 60 МПа. Сведения о величине показателя адиабаты найдите самостоятельно.



## Прогнозирование параметров превращения и разрушительного воздействия продуктов аварийного выброса

Рассматриваемая в этой главе технология отличается повышенной сложностью прогнозирования параметров привлекаемых моделей, что обусловлено разнообразием способов и форм разрушительного воздействия на различные объекты аварийно высвободившегося энергозапаса и продуктов его физико-химического превращения в виде взрыва или горения. Кроме того, если изучаемые до сих пор истечение и распространение вредных энергетических и материальных выбросов подчинялись объективным закономерностям энергомассообмена, то они не всегда пригодны для исследуемого здесь превращения и разрушительного воздействия. Поэтому наряду с используемыми ранее моделями здесь применяются *сценарные* методы исследования.

### 15.1. Особенности прогнозирования параметров превращения и поражающего действия аварийного высвободившегося энергозапаса

Уяснение заявленной выше специфики продолжим констатацией следующей черты применяемых моделей: в отличие от известных вероятностно-статистических соотношений, возможность трансформации АХОВ, не говоря уже о ее форме и поражающем эффекте соответству-

ющих факторов, характеризуется уже качественно другой *неопределенностью*.

Прежде всего это относится к живучести человека и иных биособей, т.е. к их стойкости по отношению к неблагоприятным воздействиям. Ведь каждая подобная потенциальная жертва уникальна, и существенные в этом смысле параметры разительно отличаются даже в разные периоды ее жизненного цикла. Если же учесть невозможность натурального экспериментирования с опасностью и ограниченность статистических данных о происшествиях с людьми, то можно понять и сложность теоретического прогноза причиняемого им ущерба.

Второй особенностью прогнозирования рассматриваемых здесь параметров трансформации и разрушительного воздействия возникших при этом вторичных поражающих факторов является необходимость учета чрезвычайно большого числа свойств не только их потенциальных жертв, но и источника подобных угроз. Естественно, что не все они могут быть описаны математическими соотношениями, полученными на основе лишь теоретических представлений и пригодных для всех реально возможных на практике ситуаций.

Особенно показательна в этом отношении авария, вызванная разрушением емкости со сжиженным углеводородным газом и сопровождающаяся практически мгновенным испарением соответствующей парогазовой смеси. Однако дальнейшая судьба образовавшегося при этом облака ТВС уже не столь очевидна — оно может: а) постепенно рассеяться, не причинив вреда, б) сгореть в атмосфере после воспламенения, в) взорваться, попав в замкнутый объем. Столь же сложно предсказать, где и в результате чего это произойдет, что или кто окажется вблизи, насколько они защищены и как пострадают из-за поражающего воздействия теплового излучения, воздушной ударной волны и осколков, образовавшихся в результате взрыва.

Из всего вышеизложенного следует *нереальность* создания какой-либо универсальной модели трансформации и разрушительного воздействия всех возможных выбросов ОПЮ, а значит, и необходимость *опоры на интуитивный метод сценариев*. Именно по этому пути пошли авторы известных ныне методик, предназначенных для прогноза параметров превращения продуктов аварийного выброса и причинения ущерба их поражающими (тепловыми, токсичными, фугасными и иными) факторами.

Потребность в *сценарном* рассмотрении исследуемых здесь этапов причинения ущерба *предопределена* также и структурой формул (13.3) и (13.4), предложенных выше для априорной оценки величины техногенного риска. Так как общая процедура выявления учитываемых ими сценариев при построении диаграмм типа «дерево событий» уже рассмотрена ранее (см. параграф 13.2), то основное внимание

в этой главе будет уделено тем моделям и методам, которые наиболее пригодны для прогноза сценарных параметров, входящих в каждую из только что упомянутых расчетных формул. В частности, оценку имеющих там вероятностей  $Q_{ab}^I$  и  $Q_i^I$  причинения ущерба различным объектам из состава людских, материальных и природных ресурсов ниже предлагается проводить по полуэмпирическим формулам, параметрами которых служат токсические или энергетические дозы вредного воздействия.

Использование подобных формул и параметров, а также *дефицит* критериев типа «пороговая доза» следует считать еще одной особенностью прогнозирования параметров рассматриваемых здесь конечных стадий причинения техногенного ущерба. Дело в том, что этот инструментарий применим лишь для прогноза вероятности причинения: а) ущерба определенной степени тяжести; б) вполне конкретному объекту; в) четко оговоренным опасным или вредным фактором. Иначе говоря, каждый прогнозируемый исход разрушительного воздействия, оцениваемый с помощью данных вероятностей, характеризуется сугубо специфичным набором свойств угрозы и его потенциальной жертвы.

Среди способов *определения* и представления только что упомянутых полуэмпирических зависимостей и входящих в них параметров можно выделить и экспериментальные, и теоретические. Первые базируются на статистической обработке эмпирических данных, накопленных изучением последствий реальных происшествий в техносфере либо опытов над животными. В большинстве случаев именно они и использованы при составлении и оценке параметров так называемых *пробит-функций* [13], порядок практического применения которых подробно рассматривается несколько ниже (см. параграф 15.2).

Вторые же связаны с моделированием потенциальной жертвы как реципиента (адсорбера, ингалятора) опасных и вредных техногенных факторов. Например, при оценке последствий разрушительного воздействия электротока моделью человека будет служить сосуд, образованный его кожным покровом, плохо проводящим ток, и внутренними тканями, пропитанными жидкостью с ничтожно малым электрическим сопротивлением. Если же моделируется процесс токсического воздействия на живые организмы, то их органы уже могут быть представлены в виде совокупности камер, которые вначале постепенно впитывают в себя вредное вещество, а затем и разрушаются по этой причине.

Что касается прогноза результатов *поражающего воздействия* рассматриваемых здесь опасных и вредных выбросов на конкретные объекты, то при его проведении будем пользоваться зависимостями между вероятностями  $Q_{ab}^I$ ,  $Q_i^I$  их вывода из строя либо повреждения конкретной тяжести и поглощенной ими дозой соответствующих фак-

торов ( $DP$ ). Графики подобных зависимостей  $R(DP)$ , иногда называемые функциями «доза — эффект» (где под  $R$  подразумевается риск, измеряемый одной из только что перечисленных вероятностей причинения конкретного ущерба), изображены на рис. 15.1, а.

Как ясно из этой части данного рисунка, функции «доза — эффект» могут иметь как сравнительно простой вид (прямая 1), так и более сложный (кривая 2) характер. При этом во втором случае можно выделить четыре различных эффекта: а) при значениях дозы, принадлежащих отрезку  $[0; DP_1]$ , имеет место так называемый *гормезис* (благоприятное влияние малых доз вредного фактора на рассматриваемый объект); б) диапазон  $[DP_1; DP_2]$  соответствует уже области безразличия или нейтральной реакции реципиента; в) при значениях поглощенной дозы  $[DP_2; DP_3]$  наблюдается нелинейное, монотонное возрастание разрушительного эффекта; г) превышение же дозой величины  $DP_3$  приводит уже к гибели всех объектов, подвергшихся столь интенсивному воздействию какого-либо поражающего фактора.

На рис. 15.1, б показано уже зеркальное отображение того отрезка кривой 2, который соответствует диапазону  $[DP_2; DP_3]$  изменения ее аргумента. Этот график является зависимостью между риском (вероятностью  $Q_{ab}^1$  или  $Q^1$ ) причинения конкретного ущерба —  $R$  и удаленностью поражаемого объекта от источника аварийного выброса энергии или вредного вещества —  $X$ . Например, для взрыва облака углеродородного газа массой 32 т эта зависимость имеет место на интервале между радиусом смертельного поражения людей ( $X_3 < 140$  м) и радиусом их безопасного удаления ( $X_2 \geq 250$  м).

Можно привести и другие сведения, подтверждающие правомерность подобного подхода к прогнозу рассматриваемых здесь мер возможности причинения техногенного ущерба. Вот почему в большинстве случаев обычно рекомендуется руководствоваться как нелинейным характером функций  $R(DP)$  и  $R(X)$ , так и строго определенным содержанием их аргументов. При этом для значений доз поражающего фактора, меньших  $DP_2$  и больших  $DP_3$ , можно исходить из предположения о полной безвредности и абсолютной губительности соответствующих вредных воздействий на определенный объект, тогда как внутри образуемого этими дозами интервала — подразумевать вероятностный характер причинения ему вполне конкретного ущерба.

Проиллюстрируем данный способ прогнозирования на примере тех параметров вредного термического и барического воздействия, которые способны причинять ущерб различной степени тяжести незащищенным от них людям и производственным сооружениям. Для этого воспользуемся известными моделями изменения агрегатного состояния (испарение, кипение) АХОВ и их физико-химического превращения с интенсивным энерговыделением (горение, взрыв), имея в виду, что они являются параметрическими формулами. Например,

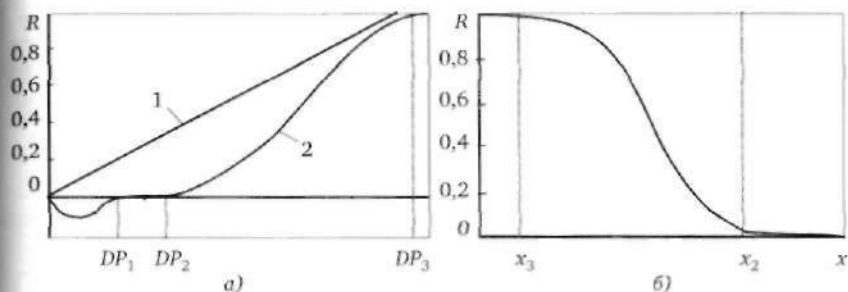


Рис. 15.1. Графики параметрических законов поражения:

а — функции «доза — эффект»; б — зависимость между риском причинения конкретного ущерба и удаленностью поражаемого объекта от источника аварийного выброса энергии или вредного вещества

интенсивность  $q_{ис}$  испарения пролитого на площадь  $\Pi$ , м<sup>2</sup>, жидкого углеводородного топлива можно оценивать по полуэмпирической формуле

$$q_{ис} = \Pi \mu^{1/2} 10^{-6} (5,83 + 4,1U) P_{ис}, \quad (15.1)$$

где  $\mu$  — молярная масса вещества, кг/моль;  $P_{ис}$  — давление насыщенных паров вещества, Па;  $U$  — скорость ветра в приземном слое, м/с (заметим, что данная модель не учитывает уменьшения температуры пролива вследствие испарения, что дает завышенные значения величины  $q_{ис}$ ).

Рассматривая горение пролитого топлива с малой (до 1 м/с) скоростью распространения фронта пламени, отметим, что образующийся при этом тепловой поток  $q_T$  рекомендуется рассчитывать по аналогичным формулам. Их параметрами (см., например, выражения (14.6)) будут площадь и суммарная теплоизлучающая поверхность пожара, температура внешней части факела и степень его черноты, массовая скорость, теплота сгорания горючего вещества и коэффициенты, характеризующие его специфику. Аналогичные формулы используются и для оценки параметров так называемого огненного шара.

Что касается последствий теплового воздействия, например на человека, то они зависят главным образом от его возраста и размеров пораженной площади кожного покрова: здоровые взрослые люди и подростки выживают, если ожоги 2-й и 3-й степени не превышают 20% поверхности тела, тогда как их спасение становится проблематичным после поражения половины кожного покрова. Более детальные сведения о вероятности  $Q_{ab}^I$  летального исхода термического поражения среднестатистического человека для различных периодов его жизни и площади кожного покрова приведены в табл. 15.1.

Таблица 15.1. Вероятность смерти людей от термических ожогов кожи [6]

Площадь поражения кожного покрова, %	Возраст человека, лет						
	5—9	15—19	25—29	35—39	45—49	55—59	65—69
Более 93	1	1	1	1	1	1	1
83—87	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1
73—77	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1	1
63—67	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1
53—57	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1
43—47	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1
33—37	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8
23—27	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,6
13—17	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3
3—7	0	0	0	0	0	0	0,1

Анализ приведенных данных свидетельствует не только о большом разбросе вероятности летального исхода в тех случаях, когда площадь термического поражения занимает примерно половину кожного покрова человека, но и заметном росте значений этой вероятности по мере увеличения его возраста.

Для оценки меры возможности и особенностей физико-химической трансформации паров горючих веществ, образовавшихся в результате аварии, рекомендуется более сложная процедура. С этой целью все горючие вещества в настоящее время принято делить на четыре группы (табл. 15.2): 1 — особо чувствительные к интенсивному превращению, 2 — чувствительные, 3 — умеренно чувствительные и 4 — слабо чувствительные. Аналогично классифицируются и заполненные подобной ТВС пространства, среди которых рекомендуется различать также четыре класса: 1 — сильно загроможденные, с замкнутыми полостями, 2 — загроможденные, с полузамкнутыми объемами, 3 — частично загроможденные отдельными предметами и 4 — слабо загроможденные.

Введенные выше классы чувствительности горючего вещества и загроможденности объема пространства, заполняемого его парами, используются для прогнозирования наиболее вероятного режима возможной физико-химической трансформации образовавшейся при этом ТВС. Учитываемые при этом шесть режимов ее наиболее вероятного интенсивного преобразования приведены в табл. 15.3. При этом цифры режимов означают следующее:

1 — детонация (взрыв, при скорости распространения волны более 500 м/с);

2 — дефлаграция (горение ТВС) при скорости 300—500 м/с;

3 — дефлаграция при скорости 200—300 м/с;

4 — дефлаграция при скорости 100—200 м/с;

Таблица 15.2. Вещества и коэффициенты удельного энерговыделения ( $\beta$ )

Группа 1		Группа 2		Группа 3		Группа 4	
Вещество	$\beta$	Вещество	$\beta$	Вещество	$\beta$	Вещество	$\beta$
Ацетилен	1,1	Бутан	1,04	Ацетон	0,56	Аммиак	0,42
Винилацетилен	1,03	Бутилен	1,0	Бензин	1,0	Дизтопливо	1,0
Водород	2,73	Бутадиен	1,0	Гексан	1,0	Керосин	1,0
Гидразин	0,44	Пропан	1,05	Метиламин	0,7	Метан	1,0
Изопропилнитрат	0,4	Пропилен	1,04	Метилацетат	0,5	Метилбензол	1,0
Метилацетилен	1,05	Этан	1,08	Октан	1,0	Оксид углерода	0,2
Нитрометан	0,25	Этилен	1,07	Сероводород	0,3	Хлорбензол	0,5
Оксид этилена	0,62	Эфиры	0,7	Спирт этил	0,62	Фенол	0,92
Этилнитрат	0,3	ШФЛУ	1,0	СУГ	1,0	Этилбензол	1,0

*Примечания.* Коэффициент  $\beta$  уточняет теплоемкость вещества относительно метана. ШФЛУ — широкая фракция легких углеводородов. СУГ — сжиженные углеводородные газы.

5 — дефлаграция при скорости, равной  $40 \cdot M^{1/6}$  м/с ( $M$  — масса облака, т);

6 — медленная дефлаграция при скорости  $21 \cdot M^{1/6}$  м/с.

Что касается разрушительного эффекта избыточного давления на фронте воздушной ударной волны, то статистические сведения о нем приведены в табл. 15.4. В ее левой колонке даны пороговые значения такого давления, а в остальных — характер причиненного им ущерба зданиям, применительно к четырем диапазонам его деления, и оказавшимся в них людям, с учетом доли и степени их травмирования.

На этом завершим краткое знакомство с особенностями прогнозирования форм проявления техногенного ущерба и параметров, влияющих на них на рассматриваемом здесь этапе исследования процесса его причинения.

Таблица 15.3. Режимы взрывного горения топливоздушных смесей

Подгруппа вещества	Класс загроможденности пространства			
	1	2	3	4
1	Режим 1	Режим 1	Режим 2	Режим 3
2	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
3	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5
4	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6

Таблица 15.4. Последствия разрушительного эффекта воздушной ударной волны

Избыточное давление, кПа	Характер разрушений здания	Доля людей, получивших травмы, %			Ущерб зданию, % от стоимости
		крайне тяжелые	тяжелые	средней тяжести	
1—3	Слабые	—	0,1—0,3	3—7	5—10
3—6	Средние	0,1—0,3	0,5—1,5	5—15	10—20
6—9	Сильные	0,5—1,5	3—7	15—25	40—60
30—60	Полное	5—10	15—20	40—60	100—150*

\* Из-за дополнительных затрат на разборку и удаление поврежденных конструкций.

В целом же можно утверждать, что накопленный ныне опыт позволяет не только судить о характере возможной трансформации и разрушительного воздействия нежелательных выбросов ОТУ, но и оценивать наиболее вероятные параметры сопутствующих им поражающих факторов. Имея же такие оценки и сравнивая их с пороговыми значениями, можно найти и входящие в правую часть формулы (13.4) площади  $\Pi_i^Q$  и  $\Pi_i$ , а зная среднюю плотность  $F_i$  и стоимость  $S_i$  единицы оказавшегося там ресурса, — прогнозировать размеры соответствующего ущерба, что и будет предметом следующего параграфа.

Однако до того, как перейти к изложению соответствующей процедуры, приведем статистические данные о наиболее вероятных последствиях трансформации аварийных выбросов сжиженного углеводородного газа. Ныне считается, что в 35% случаев такой его пролив завершается взрывом возникшей при этом ТВС; в 35% — воспламенением ее облака с образованием огненного шара, в 10% — сравнительно медленным выгоранием пролива, а в оставшихся 20% случаев — постепенным рассеянием образовавшейся ТВС.

## 15.2. Модели и методы априорной оценки параметров процесса причинения техногенного ущерба

Рассматриваемые здесь способы априорной оценки возможных последствий разрушительного воздействия вредных выбросов ОПО на людские, материальные и природные ресурсы основаны на использовании полуэмпирических формул и функций<sup>1</sup> типа пробит и эрфик, а также положенных в их основу зависимостей «доза — эффект» (см.

<sup>1</sup> Термины образованы из слов *probability* (вероятность) и *error function* (функция ошибок), а приводимые ниже их сокращения ныне общеприняты в соответствующей литературе.



рис. 15.1). Этот инструментарий пригоден для одновременного прогноза как форм проявления или величин конкретного ущерба  $Y_{ab}^1$  и  $Y_v$ , так и вероятностей  $Q_{ab}^1$  и  $Q_v^1$  его причинения конкретным объектам. При этом наиболее важными параметрами служат значения поглощенных ими доз  $DP$ , приводящие подобные жертвы к вероятному и достоверному поражению.

Проиллюстрируем, как это делается на конкретных примерах. Так, в случае ингаляционного воздействия на человека и других биологических особей под поглощенной ими токсичной дозой (либо экспозиционной дозой радиационного облучения) подразумевается величина  $DP(r, \tau)$ , рассчитываемая по следующей универсальной формуле:

$$DP(r) = \int_{t_n}^{t_k} c(r, t) dt = \bar{c}(r)\tau, \quad (15.2)$$

где  $c, \bar{c}$  — реальная и средняя (на интервале  $t$ ) концентрации вредного вещества;  $t = t_k - t_n$  — время между концом и началом его ингаляционного воздействия.

Зная же величину поглощенной дозы поражающего фактора и используя зависящую от нее пробит-функцию  $Pr(DP)$ , можно затем определить долю пострадавших людей либо вероятность  $Prob$  причинения им ущерба конкретной (заранее оговоренной) степени тяжести:

$$Prob = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr(DP)} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda \quad Prob = 0,5 \left( 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{Pr(DP)-5}{\sqrt{\pi}}} e^{-\lambda^2} d\lambda \right). \quad (15.3)$$

Входящая в эти формулы функция  $Pr(DP)$  выражается следующей довольно общей зависимостью [10]:

$$Pr(DP) = a + b \ln D(r) + \gamma \ln \tau = \alpha + \beta \ln D(\bar{c}(r)\tau^{k+1}), \quad (15.4)$$

где  $a, b, \alpha, \beta, \gamma$  и  $k = \gamma/\beta$  — коэффициенты, определяемые на основе статистической обработки опытных данных и характеризующие степень уязвимости конкретного объекта от воздействия определенного вредного вещества или другого известного поражающего фактора.

Обратим внимание на достоинства предлагаемого здесь способа прогноза вероятностей  $Q_{ab}^1$  и  $Q_v^1$ . Одно из них касается эрфик-функции (15.3), которая не содержит эмпирических коэффициентов, и поэтому значения  $Prob[Pr(DP)]$  могут быть заблаговременно представлены графически или таблично. В табл. 15.5 как раз и приведено данное соотношение, показывающее, например, что величинам  $Pr(DP) = 2,67$  и  $8,09$  соответствуют  $Prob = 0,01$  и  $0,999$ . (Здесь имеется в виду, что левый столбец содержит десятые и сотые доли  $Prob[Pr(DP)]$ , т.е. первые два знака после запятой, а верхняя строка — третий после нее знак.)

Другие достоинства метода относятся к выражениям (15.4), которые имеют четкое обоснование и удобны для практического использования. Здесь подразумевается не только их линейная или степенная зависимость от параметра  $DP$ , облегчающая статистическое оценивание либо интерполяцию, но и то, что данные математические соотношения включают такие важные факторы, как поглощенную объектом дозу и период ее экспозиции.

Таблица 15.5. Значения эрфик-функции  $Pr(DP)$  [13, 39]

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,56	6,64	6,75	6,88	7,05	7,19
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Однако при априорной оценке вероятностей  $Q_{ab}^1$  и  $Q_1^1$  с помощью излагаемого здесь метода следует иметь в виду и такие его особенности:

1) в разных литературных источниках в качестве верхнего предела интегрирования в формулах (15.3) берется либо  $Pr(DP)$ , либо функция  $(Pr(DP) - 5)/2^1$ ;

2) аналогично обходятся в настоящее время и с выражением (15.4) которое в большинстве числе случаев заменяется следующим упрощенным двучленом

$$Pr(DP) = a + b \ln(DP(r, t)), \quad (15.5)$$

3) входящая в последнюю формулу токсодоза рассчитывается по формулам типа (15.2), но значение средней концентрации берется в них после возведения в некоторую степень  $n$  (см. приводимые ниже табл. 15.6 и 15.9), учитывающую специфику вредного вещества;

4) несмотря на полное совпадение структур модели (15.4) (правое выражение при  $k=1$ ) и модели (15.5), аргумент  $DP$  которой также

<sup>1</sup> Поясним, что данные табл. 15.5 получены для функции  $Prob$ , определяемой данным выражением.

зависит от концентрации  $\bar{c}$ , невозможно найти оценки параметров одной из них, если заранее известны другие;

5) в отечественных публикациях концентрация вредного вещества  $c(r, t)$  обычно выражается в  $\text{мг}/\text{м}^3$ , тогда как в зарубежных — еще и в  $\text{ppm}$  (одна миллионная часть).

Игнорирование данных особенностей может приводить к нежелательным ошибкам по причине несоответствия коэффициентов, приведенных в разной литературе для четырех последних формул. Поэтому для избежания недоразумений при априорной оценке исхода поражения любого объекта с помощью пробит-функций необходимо вначале проверить достоверность соответствующих коэффициентов, а затем убедиться в их пригодности к конкретной эрфик-функции. Сделать последнее можно, подставляя параметры  $a$  и  $b$  (а иногда и  $n$ ) в выбранное для  $DP$  выражение и вычисляя его значение. В одном случае левая часть этих формул должна принимать нулевое значение, а в другом — оказаться равной 5.

В случае несовпадения размерностей концентрации вредного вещества целесообразно воспользоваться следующим соотношением [27]:

$$c(\text{ppm}) = 0,08205cT/(PM_0), \quad (15.6)$$

где  $c$  — концентрация вредного вещества,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $M_0$  — его молекулярная масса,  $\text{г}/(\text{г} \cdot \text{моль})^1$ ;  $T$  — температура внутри газовой смеси,  $\text{К}$ ;  $P$  — давление там же,  $\text{кг}/\text{см}^2$ .

Рассмотрим возможность нормирования дозы  $DP$ , т.е. назначения размеров пятна загрязнения вредным веществом с критической (равной 50%) вероятностью поражения оказавшегося внутри человека, в предположении об известности параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $k$  наиболее общих зависимостей (15.4) и  $a$ ,  $b$  — из их упрощенного варианта — формулы (15.5). После приравнивания правых частей этих двух выражений значению пробит-функции  $Pr_{\text{кр}}(DP) = 5$ , взятому из табл. 15.5 для  $Prob(Pr) = 50\%$ , имеем:  $DP_{\text{кр}}(r, \tau) = \exp[(5 - \alpha)/\beta]$  и  $DP_{\text{кр}}(r, \tau) = \exp[(5 - a)/b]$ .

Если же приравнять правые части найденных таким образом двух уравнений и заменить в них  $DP_{\text{кр}}$  на выражение из формулы (15.2), то получим следующие два аналитических выражения, каждое из которых определяет критическую поглощенную дозу человеку, находящемуся в точке пятна загрязнения с координатами  $(x_p; y_p)$  в течение интервала времени  $\tau^* = t_k^* - t_n^*$ :

$$DP_{1\text{кр}} = \int_{t_n^*(r_p)}^{t_k^*(r_p)} c(x_p, y_p, 1,5; t) dt \cdot (\Delta t^*(r_p))^k; \quad DP_{2\text{кр}} = \int_{t_n^*(r_p)}^{t_k^*(r_p)} c^n(x_p, y_p, 1,5; t) dt. \quad (15.7)$$

<sup>1</sup> Поясним, что величина данного параметра хотя и численно равна молярной массе ( $\text{кг}/\text{моль}$ ), но отличается от нее другой размерностью ( $\text{г}/(\text{г} \cdot \text{моль})$ ).

Оказывается, что получить аналитическое выражение для искомой здесь изолинии  $DP_{кр}(r, t)$  можно и без численного решения этих двух уравнений. Для этого нужно воспользоваться базовой моделью (14.45), (14.46), введя в нее ряд упрощающих допущений: а) приравнять  $f_p(t) = f_{ос}(t) = 1$ , т.е. игнорировать снижение за время  $\tau^*$  концентрации вредного вещества из-за его разбавления атмосферой и оседания на землю; б) изолинию строить на плоскости с координатами  $r(x_p, y_p; 1,5)$ , а в качестве исходного уравнения принять формулу (15.2); в) учитывая малое изменение скорости  $u_x$  за время  $\tau^*$  между началом  $t_n^*$  и концом  $t_k^*$  ингаляции, приравнять  $\sigma_i^2(u_x \tau^*)$  к  $\sigma_i^2(x_p)$  (где  $x_p = u_x \tau^*$ , а  $\tau^* = t_k^* - t_n^*$ ) и обозначать эту дисперсию через  $\Delta_z^2$ .

С учетом подобных и практически приемлемых допущений имеем [10]:

$$DP_{кр} = \frac{M}{4\pi\Delta_y\Delta_z u_x} \left[ \Phi\left(\frac{x_p}{\sqrt{2\Delta_x}}\right) + 1 \right] \exp\left(-\frac{y_p^2}{2\Delta_y^2}\right) \times \left[ \exp\left(-\frac{(1,5-z_0)^2}{2\Delta_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(1,5+z_0)^2}{2\Delta_z^2}\right) \right], \quad (15.8)$$

откуда после разрешения относительно  $y_p$  с учетом зависимости  $\Delta_z^2$  от  $x_p$  может быть получена формула, позволяющая построить требуемую изолинию поля концентрации:

$$y_p = \pm \sqrt{2\Delta_y(x_p)} \times \sqrt{\ln \frac{M\Phi\left(\frac{x_p}{\sqrt{2\Delta_x(x_p)}}\right) + 1 \left[ \exp\left(-\frac{(1,5-z_0)^2}{2\Delta_z^2(x_p)}\right) + \exp\left(-\frac{(1,5+z_0)^2}{2\Delta_z^2(x_p)}\right) \right]}{DP_{кр} 4\pi\Delta_y(x_p)\Delta_z(x_p)u_x}}}. \quad (15.9)$$

Поясним смысл только что полученного выражения геометрического места точек, окаймляющих зону опасного загрязнения токсическим веществом. Оказывается, что ее координаты соответствует тому положению людей, не имеющих средств защиты дыхания, находясь в котором с заданной (50%-ной) вероятностью обеспечивается получение ими критической дозы  $DP_{кр}(r)$  вредного ингаляционного воздействия.

При необходимости изложенная здесь процедура обоснования конкретной вероятности причинения/непричинения токсического ущерба может быть откорректирована на предмет уточнения времени  $\tau = t_k - t_n$  с учетом реальной нестационарности поля концентрации. Для этого в выражении (15.2) целесообразно установить пределы интегрирования  $t_n = t_1^*$  и  $t_k = t_2^*$ , так как моменты времени подхода и ухода пятна загрязне-

ния зависят от местоположения  $r(x, y, z)$  человека без средств защиты дыхания. Если же на химически опасных объектах встанет задача определения соответствующих изолиний пятна загрязнения с помощью последнего уравнения, то при выборе начала и конца времени экспозиции целесообразно исходить из следующих наиболее опасных условий:  $t_n = t_{\max} - \tau$ ;  $t_k = t_{\max} + \tau$ , где  $t_{\max}$  — момент наступления максимальной концентрации в конкретной точке этого пятна, правомерность появления которого обсуждалась выше (см. параграф 14.3).

Что же касается значений параметров  $a$ ,  $b$  и  $DP$ , входящих в правую часть формулы (15.5) для пробит-функции, то некоторые из них даны в табл. 15.6.

**Таблица 15.6.** Параметры пробит-функции для некоторых факторов и объектов

Фактор и его эффект для объекта	$a$	$b$	$DP$	Примечание
<i>1. Фугасный</i>				
Разрушение промышленных зданий	5	-0,22	$(40\,000/\Delta P)^{6,4} + (460/I)^{11,3}$	$\Delta P$ — перепад давления, Па; $I = (\Delta P \cdot \Delta t)/2$ — импульс давления, Па·с
Трудно реставрируемые повреждения зданий	5	-0,26	$(17\,500/\Delta P)^{8,4} + (290/I)^{9,3}$	
Гибель людей от: а) разрыва легких	5	-5,74	$4,2/(1 + \Delta P/P_0) + 1,3(P_0^{0,5} m^{1/3})/I$	$P_0$ — атмосферное давление, Па; $m$ — масса тела человека, кг
б) метательного эффекта воздушной ударной волны (ВУВ)	5	-2,44	$738\,000/\Delta P + 130\,000\,000/(\Delta P I)$	
Повреждение слуха	-12,6	1,52	$\Delta P$	
<i>2. Осколочный</i>				
Режущие осколки массой до 0,1 кг	-29,6	2,1	$mU^{5,12}$	$m$ — масса осколка, кг; $U$ — скорость осколка, м/с (для стекла $U \approx 20$ м/с)
Ударные осколки массой до 0,1 кг	-16,6	5,3	$0,5mU^2$	
Осколки массой от 0,1 до 4,2 кг и более	-13,2	10,5	$U$	
<i>3. Тепловой</i>				
Ожоги 1-й степени	-39,8	3,02	$\Delta t q^{4/3}$	$\Delta t$ — время, с; $q$ — мощность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>
Ожоги 2-й степени	-43,1	3,02	$\Delta t q^{4/3}$	
Гибель людей без защитной одежды	-36,4	2,56	$\Delta t q^{4/3}$	
Гибель людей в защитной одежде	-36,2	2,56	$\Delta t q^{4/3}$	

Фактор и его эффект для объекта	$a$	$b$	$DP$	Примечание
Токсический*	*	*	$\bar{C}^n \tau$	$\bar{C}$ — средняя концентрация, мг/м <sup>3</sup> ; $\tau$ — время, мин

Примечание. \* Учитывая большое число ныне применяемых токсикантов, их коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $n$  (последний указывает на превышение токсичности конкретного вредного вещества относительно некоторого эталонного значения) будут приведены ниже, в параграфе 15.4 (см. табл. 15.9).

Конкретные примеры, иллюстрирующие возможность не только определения подобных параметров, но также работоспособность рассмотренных здесь и ранее (см. гл. 13) моделей, будут представлены ниже, после ознакомления с одним из способов прогноза вероятности  $Q_{ab}^1$  фугасного поражения различных зданий и сооружений. В частности, их стойкость к воздействию воздушной ударной волны может характеризоваться: а) коэффициентами:  $K_{B_j}$  — высоты ( $B_j$ , м) этих объектов и  $K_{\Phi_j}$  — доли их фронтального остекления ( $\Phi_j$ , %); б) воздействующим на них давлением:  $\Delta P_{jcp}$  — базовым и  $\Delta P_{0jcp}$  — средним арифметическим от четырех значений, приводящих к повреждениям заранее установленной степени тяжести.

Указанные коэффициенты рассчитываются по следующим полуэмпирическим формулам [36]:

$$K_{B_j} = 1 + 3,40/B_j; \quad K_{\Phi_j} = [(1,36 + \Phi_j)^2 + \Phi_j(1 - \Phi_j)]^{1/2} - 0,36, \quad (15.10)$$

тогда как уточненные давления  $\Delta P_{ji}$ , приводящие к разрушениям каждой из принятых ныне в строительстве четырех степеней тяжести, будут оцениваться следующим образом:

$$\Delta P_{ji} = \Delta P_{jcp} (0,07 + 0,37i); \quad \Delta P_{jcp} = K_{B_j} K_{\Phi_j} \Delta P_{0jcp}. \quad (15.11)$$

Входящий в последнюю формулу параметр  $\Delta P_{0jcp}$  определяется в настоящее время экспериментально, а ряд его значений приведен в табл. 15.7 [6].

Оценку последствий разрушительного эффекта воздушной ударной волны рекомендуется проводить с использованием как детерминистских, так и вероятностных критериев. В первом случае для этого применяются пороговые значения  $\Delta P_{ji}$  из второй колонки табл. 15.4 — для каждой ( $i = 1 \div 4$ ) степени повреждения здания. При этом подразумевается следующее:

а) если давление  $\Delta P_{\Phi}$  на фронте ВУВ превышает  $\Delta P_{j4}$ , то реальные невосстанавливаемые повреждения зданий и массовая гибель находящихся в них людей;

Таблица 15.7. Значения базовых давлений для зданий и сооружений

Наименование (тип) здания или сооружения	$\Delta P_{\text{баз}}, \text{кПа}$
Антисейсмическое, повышенной прочности	80
С тяжелым каркасом и крановым оборудованием	30
То же самое, но без кранового оборудования	25
Железобетонное каркасное	27
С легким металлическим каркасом и без него	20
Кирпичное бескаркасное	13
С металлическим каркасом и под волнистой сталью	10
Деревянное	7

б) при давлениях  $\Delta P_{j3} < \Delta P_{\phi} \leq \Delta P_{j4}$  возможны реставрация зданий и выживание большинства их обитателей;

в) при  $\Delta P_{j2} < \Delta P_{\phi} \leq \Delta P_{j3}$  следует ожидать полное разрушение остекления и увечья людей;

г) при  $\Delta P_{j1} < \Delta P_{\phi} \leq \Delta P_{j2}$  вероятны лишь повреждения остекления зданий и незначительные ушибы их посетителей.

При вероятностной оценке фугасного воздействия, учитывающей разброс прочностных свойств реальных строительных объектов, уже руководствуются зависимостью вероятности  $Q_i$  конкретной ( $i$ -й) степени повреждения от математического ожидания  $i_{\text{ср}}$  этой случайной для них величины. При этом используют также следующие формы причинения зданиям  $j$ -го типа  $i$ -х фугасных повреждений: 1 — легкое (10%-ное уничтожение остекления), 2 — среднее (полное разрушение стекол), 3 — трудно реставрируемое тяжелое повреждение и 4 — не восстанавливаемое разрушение здания. График зависимости вероятности  $Q_i(i_{\text{ср}})$  от степени повреждения показан на рис. 15.2.

Что касается оценки значений параметра  $i$ , являющегося аргументом оцениваемой здесь вероятности и характеризующего ожидаемую степень причинения ущерба, то он может быть рассчитан по следующим полуэмпирическим формулам [36]:

$$i_{\text{ср}} = 5[1 - \exp(-f_1)]; f_1 = 0,7(\Delta P_{\phi} / \Delta P_{\text{жср}} - 0,3). \quad (15.12)$$

При использовании последнего уравнения можно ориентироваться на следующие значения фигурирующих там давлений на фронте воздушной ударной волны  $\Delta P_{\text{жср}}$  (бар):  $\Delta P_{1\text{ср}} = 0,01$ ;  $\Delta P_{2\text{ср}} = 0,03$ ;  $\Delta P_{3\text{ср}} = 0,1$  и  $\Delta P_{4\text{ср}} = 0,3$ .

При экономической оценке непосредственного ущерба поврежденным зданиям и сооружениям можно руководствоваться средней относительной стоимостью соответствующих ремонтно-восстанови-

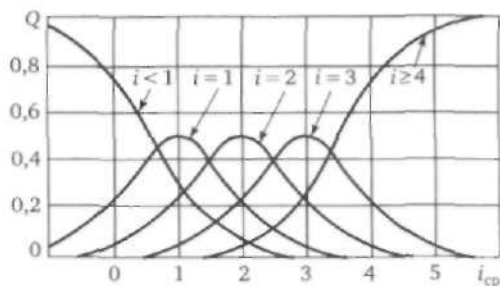


Рис. 15.2. Графики зависимостей  $Q(i_{ср})$

тельных работ, рассчитываемой как процентная доля начальной цены рассматриваемых здесь объектов. Величина подобного ущерба может быть аппроксимирована, например, следующими полуэмпирическими формулами:

$$S_{i_{ср}} = 1 - \exp(-f_2); f_2 = 0,05i_{ср}^{2,4}. \quad (15.13)$$

При отсутствии данных о цене поврежденного здания величина причиненного ему ущерба должна оцениваться по стоимости ремонта всех его помещений как произведение их общей площади  $\Pi_j$ , м<sup>2</sup>, цены Ц одного человеко-дня, руб., известной в конкретной отрасли, продолжительности ремонта  $\tau_{i_{ср}}$ , дни, и среднего числа  $\mathcal{C}_{i_{ср}}$  занятых в нем людей. Значения последних двух параметров можно прогнозировать с помощью следующих формул:

$$\mathcal{C}_{i_{ср}} = 2(9 + 0,015S_{i_{ср}}\Pi_j); \tau_{i_{ср}} = 7,2S_{i_{ср}}\Pi_j/\mathcal{C}_{i_{ср}}. \quad (15.14)$$

В завершение рассмотрения возможности вероятностного прогноза ущерба от фугасного эффекта взрыва обратим внимание на его способность отбрасывать людей и не прикрепленные к земле объекты, а также поражать их летящими фрагментами зданий, транспортных средств и оборудования. В отдельных случаях по этой причине возможен разброс массивных предметов на удалении до 1 км. Поскольку предусмотреть подобный эффект довольно сложно (убедиться в этом можно будет ниже — ознакомившись с гл. 21), то обычно (см. среднюю часть табл. 15.6) ограничиваются оценкой вероятности поражения людей лишь сравнительно небольшими осколками.

### 15.3. Апробация методов прогнозирования ущерба от возможных происшествий

Продемонстрируем работоспособность методов, рекомендуемых для прогнозирования параметров всех четырех стадий процесса причи-



нения техногенного ущерба. Причем сделаем это с помощью рассмотренной ранее (см. рис. 10.5) модели, в правой части которой учтены три исхода аварийного истечения и неконтролируемой трансформации горючего: взрыв, пожар и испарение. Напомним, что цифры в скобках на ветвях имеющегося на рисунке дерева событий обозначают следующие параметры: первые — условные вероятности  $Q_i$  исходов, вторые —  $K_j$  количество пролитого горючего или площади  $P_k$  зон разрушительного воздействия поражающих факторов возможного взрыва или пожара.

В частности, верхняя (Б) ветвь этой диаграммы указывает на возможность большой (375 т) утечки жидкого водорода по причине полного разрушения резервуара. Столь же вероятна трансформация продуктов подобного пролива в форме объемного взрыва (В) облака образовавшейся при этом ТВС, интенсивного пожара (П) или просто испарения (И). Образовавшиеся при этом зоны возможного поражения характеризуются следующим: а) взрыв облака — площадью около 6 га и тремя видами (1—3) уничтоженных ресурсов; б) пожар с образованием огненного шара — 1,2 га и двумя (4, 5) группами поврежденных объектов.

Оценку площадей вероятного  $P_i^Q$  и достоверного  $P_i$  поражения, а также стоимости ущерба  $Y_{ab}^i$  осуществим в соответствии с изложенными выше рекомендациями. При этом количество участвующего во взрыве/пожаре горючего примем равным весу жидкого водорода в емкости или его пролитой части. Руководствуясь этими данными, спрогнозируем вначале поля концентрации и способ трансформации пролива, а затем параметры и радиусы действия фугасного и термического поражающих факторов. А вот оценку мер возможности и результата причинения конкретного ущерба различным объектам каждым таким фактором проведем исходя из их стойкости и затрат на восстановление.

Для оценки величины фугасного ущерба от взрыва (ветвь Х-Б-В) потребовалось определить тротильный эквивалент облака возникшей ТВС, что и было сделано с помощью формулы (14.10):  $\Xi_{\tau} = 0,0097 \times 0,5 \cdot 2,73 \cdot 375\,000 \cdot 2 = 10\,000$  кг. Затем с использованием выражения (14.9) рассчитывалась величина того избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$ , которое могло иметь место на различном удалении от центра взрыва или поверхности огненного шара. Например, для расположенного вблизи цеха по производству жидкого водорода (удаление  $X_{\phi} = 100$  м) имеем следующий результат:

$$\bar{X}_{\phi} = 100 / (10\,000)^{1/3} = 4,64 \text{ (м/кг}^{1/3}\text{)};$$

$$\Delta P_{\phi} = \{[(1,60 + 0,91 \cdot 4,64) / 4,64]^2 - 1\} \cdot 103,32 = 59,37 \text{ (кПа)},$$

что вдвое выше базового для него давления (см. табл. 15.7, вторая строка).

Прогнозирование возможного при этом ущерба осуществлено с учетом параметров стойкости рассматриваемого производственного сооружения, представляющего трехэтажное кирпичное здание с тяжелым каркасом, высотой 12 м и степенью фронтального (к месту взрыва) остекления 30%. По формулам (15.10) установлено, что

$$K_B = 1 + 3,4/12 = 1,28 \text{ и } K_\Phi = [(1,36 + 0,3)^2 + 0,3(1 - 0,3)]^{0,5} - 0,36 = 1,35.$$

Затем, используя эти данные и математические соотношения (15.11), удалось найти не только усредненное  $\Delta P_{\text{жр}} = 1,28 \cdot 1,35 \cdot 13 = 22,46$  кПа, но и пороговые давления:  $\Delta P_{j1} = 22,46 (0,07 + 0,37 \cdot 1) = 9,88$ ;  $\Delta P_{j2} = 18,19$ ;  $\Delta P_{j3} = 26,50$  и  $\Delta P_{j4} = 34,81$  кПа.

Оценка ожидаемой в среднем степени повреждения этого здания проведена с помощью формул (15.12):  $f_1 = 0,71 \cdot (59,37/22,46 - 0,30) = 2,52$ ;  $i_{\text{ср}} = 5 \cdot (1 - e^{-2,52}) = 4,25$ , а вероятностей причинения ему ущерба конкретной степени тяжести — по графикам рис. 15.2 (при  $i_{\text{ср}} = 4,25$ ). При этом получены следующие значения искомых вероятностей: для первой степени поражения  $Q_{j1} = 0$ , для второй  $Q_{j2} = 0,03$ , для третьей  $Q_{j3} = 0,08$  и для четвертой  $Q_{j4} = 0,8$ .

Для вероятностной оценки ущерба персоналу цеха, вызванного «метательным» эффектом воздушной ударной волны, были использованы пробит-функции и их коэффициенты из табл. 15.6. Расчеты по ним привели к следующим довольно правдоподобным результатам: избыточное давление на фронте ВУВ в 0,5—0,8 МПа приводит к смертельному поражению всех людей; его величина в 0,35—0,5 МПа чревата летальным исходом в 50% случаев; 0,2—0,3 МПа означают порог смертельного эффекта, а 0,13—0,2 МПа сопровождается тяжелой степенью повреждения барабанных перепонок и легких человека в 50% случаев.

Что касается термического поражения (ветвь II с рассматриваемыми исходами 4 и 5), то оценка возможности сгорания ТВС с образованием огненного шара осуществлена по результатам прогноза концентрации соответствующего облака на момент достижения им производственного цеха, т.е. для  $r(x=100; y=20; z=10)$  (метров от места аварии). При этом считалось, что масса  $M = K$  горючего в облаке равна 16 т; метеорологические условия характеризовались классом  $D$  вертикальной устойчивости атмосферы и скоростью ветра  $u_x = 3$  м/с; сам прогноз концентрации паров водорода в облаке спустя 40 с после аварии проведен с помощью модели, являющейся частным случаем фундаментального выражения (14.35) и имеющей вид

$$c(r, t = \tau) = \frac{M}{8(\pi\tau)^{3/2} \sqrt{K_x K_y K_z}} \exp\left(-\frac{[(x-x') - u_x \tau]^2}{4K_x \tau} - \frac{(y-y')^2}{4K_y \tau}\right) \times$$

$$\times \left[ \exp\left(-\frac{(z-z')^2}{4K_x \tau}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z')^2}{4K_z \tau}\right) \right]. \quad (15.15)$$

Значения входящих в это уравнение коэффициентов турбулентной диффузии взяты из табл. Г.2 для класса D и сельской местности:  $K_x = K_y = 12,1 \cdot 3 = 36,3 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $K_z = 1,07 \cdot 3 = 3,21 \text{ м}^2/\text{с}$ . Момент времени  $\tau = 40$  с выбран с учетом достижения клубом облака за это время цеха, что могло инициировать вспышку ТВС. Подстановка указанных данных в формулу (15.15) и проведение последующих вычислений привели к следующему результату:

$$c(r, t) = (16\ 000) / [8(3,14 \cdot 40)^{3/2} (36,3 \cdot 36,3 \cdot 3,21)^{1/2}] \exp[-(100 - 3 \cdot 40)^2 / (4 \cdot 36,3 \cdot 40) - 20^2 / (4 \cdot 36,3 \cdot 40)] [\exp[-0^2 / (4 \cdot 3,21 \cdot 40)] + \exp[-10^2 / (4 \cdot 3,21 \cdot 40)]] = 16\ 000 / (52\ 776 \cdot 520) 4,43 \cdot 1,65 = 0,00424 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Сравнение найденной оценки с нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени в водородной ТВС (0,00412—0,072 кг/м<sup>3</sup>) подтвердило возможность воспламенения при достижении ее облаком функционирующего цеха.

Параметры образовавшегося при этом огненного шара рассчитывались в соответствии с формулами (14.11):  $D_{\text{огн}} = 55 \cdot 16^{1/3} = 138 \text{ м}$ ,  $E_{\text{огн}} = 12,3 \cdot 16^{2/3} = 78,1 \text{ ГВт}$  и  $\tau_{\text{огн}} = \Delta t = 3,8 \cdot 16^{1/3} = 9,5 \text{ с}$ . Прогноз разрушительного эффекта теплового импульса от подобного шара был проведен на примере оценки вероятности поражения не защищенных термостойкой одеждой людей, спешно покинувших цех и уже отбежавших от него на 325 м. Для этого вначале был определен удельный тепловой импульс  $q_T \approx 78,1 \cdot 10^9 / [4\pi(70+325)^2] \approx 39,85 \text{ кВт/м}^2$  — как частное от деления мощности огненного шара на площадь сферы с радиусом, равным расстоянию между его центром и местоположением людей. Затем с помощью табл. 15.6 и 15.5 была оценена вероятность  $Q$  их гибели от теплового излучения: при этом для  $Pr = -36,4 + 2,56 \ln(9,5 \cdot 39,95^{4/3}) = 6,41$  значение искомой вероятности оказалось равным 0,92.

Подобным образом подтверждена и возможность прогноза параметров, характеризующих остальные сценарии рассматриваемой здесь аварии. Причем сделано это на примере среднего пролива (ветвь С) и с привлечением программного комплекса «Токси + Risk», позволяющего прогнозировать не только поля концентрации продуктов аварийного выброса, но и последствия их возможного воспламенения или взрыва, реализуя ту идею, которая уже была рассмотрена выше (см. параграф 15.1 — табл. 15.2 и 15.3 с комментариями). Соответствующий интерфейс с исходными данными и графической интерпретацией результатов прогноза последствий взрыва облака

ТВС, содержащего 60 т паров водорода (объем пролива), представлен на рис. 15.3.

Что касается других сведений, включающих исходные данные и результаты априорной количественной оценки последствий интенсивной трансформации в форме BLEVE продуктов этого (среднего по объему) аварийного пролива, то они приведены в табл. 15.8.

**Таблица 15.8.** Исходные данные и оценки последствий воспламенения ТВС

<b>Задача. Оценка последствий воспламенения ТВС</b>	
<i>Исходные данные</i>	
Вещество — водород. Агрегатное состояние — газообразное. Масса в облаке — 60 000 кг.	
Концентрация горючего в смеси — 0,01724 кг/м <sup>3</sup> . Удельная теплота сгорания — 120 МДж/кг.	
Окружающее пространство — слабо загроможденное. Расстояние от места аварии — 100 м	
<i>Результат расчета</i>	
Объем газового облака ТВС — 2 400 000 м <sup>3</sup> . Радиус газового облака ТВС — 83,1 м.	
Эффективный энергозапас смеси — 2 573 571 МДж. Скорость фронта пламени — 300 м/с.	
Величина пробит-функции на удалении 100 м: $Pr_1 = 9,40$ ; $Pr_2 = 6,19$ ; $Pr_3 = 0,14$ ; $Pr_4 = 4,66$ ; $Pr_5 = 8,95$ .	
Вероятность повреждения несущих элементов промышленных зданий составляет 0,9997.	
Вероятность разрушения конструкции промышленных зданий составляет 0,8933.	
Вероятность разрыва барабанных перепонки у незащищенных людей составляет 0,3688.	
Вероятность фугасного травмирования людей воздушной ударной волной 0,9984.	
Вероятность наблюдения более слабых форм причинения ущерба приближается к нулю.	
На расстоянии 100 м перепад давления $P = 83,17$ кПа; импульс фазы сжатия $I = 95,4$ кПа·с.	
Границы зон поражений при взрывах облака ТВС	
Полное разрушение зданий $R = 163,4$ м. Нереставрируемые повреждения здания $R = 284,7$ м.	
Повреждения средней части $R = 4910,6$ м. Минимальные повреждения зданий $R = 1958,8$ м.	
Полное разрушение остекления $R = 914,8$ м. 50% разрушения остекления $R = 4234,7$ м.	
10% повреждения окон — 8199,7 м. Порог выживания незащищенных людей $R = 180,6$ м	

А вот при приближенной оценке среднего ущерба, ожидаемого от наступления всех ответвлений соответствующего дерева событий, все его конечные исходы считались независимыми и несовместными случайными событиями. Поэтому математическое ожидание количества пролитого горючего оказалось равным

$$M(K) = 0,4 \cdot 375 \cdot 0,3 \cdot 60 + 0,3 \cdot 16 = 172,8 \text{ (т)}.$$

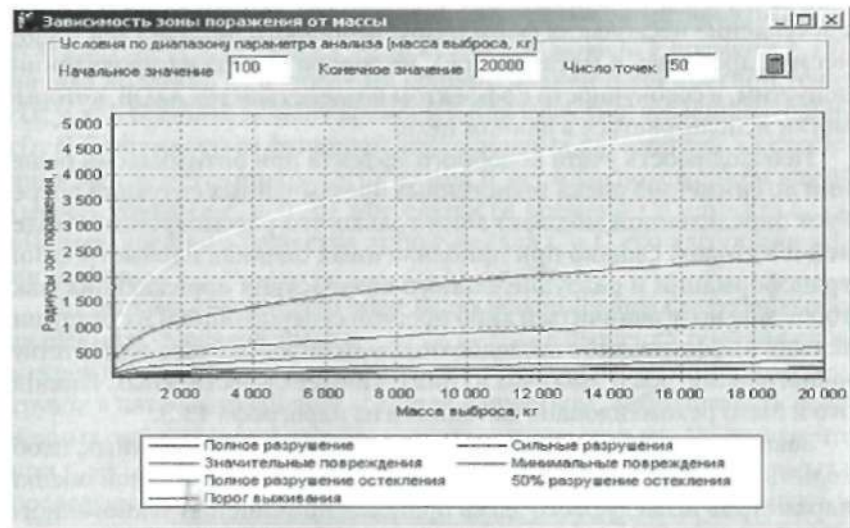
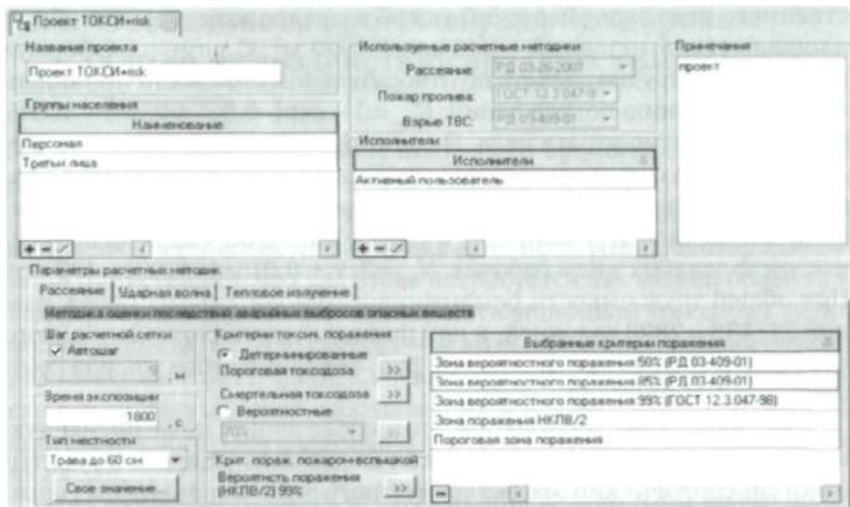


Рис. 15.3. Интерфейс «Токсик + Risk» с исходными и расчетными данными

Подобным образом сделана приближенная оценка средней площади поражения фугасными и термическими факторами. Например, в случае самого большого пролива жидкого водорода (см. рис. 10.5 — верхнюю ветвь) ее значение получилось следующим:

$$M(\Pi) = 0,3 \cdot 6 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 1 = 2,1 \text{ га.}$$

В завершение демонстрации работоспособности изложенных выше методов оценим причиненный зданию уже упомянутого производ-

ственного цеха *экономический* ущерб в предположении, что общая площадь его помещений составляла 4000 м<sup>2</sup>. С помощью формул (15.13) это нетрудно сделать по относительной стоимости причиненных этому зданию повреждений:  $C_{\text{иср}} = 1 - \exp(-0,05 \cdot 4,25^{2,4}) \approx 100\%$ , что эквивалентно утрате цеха. Подобный расчет ущерба можно сделать также по формулам (15.14), используя цену социального времени, затрачиваемого на ремонт, которое определяется перемножением длительности ремонта:  $\tau_{\text{иср}} = (7,2 \cdot 1 \cdot 4000)/62 = 21$  день на среднее число занятых в нем рабочих:  $N_{\text{иср}} = 2(9 + 0,015 \cdot 1 \cdot 4000) = 138$  чел. При общей трудоемкости ремонтно-восстановительных работ, равной  $21 \cdot 138 = 2898$  чел.-дней, и при принятой здесь стоимости одного человеко-дня в строительстве 400 руб. величина этого ущерба соответствует 1 159 200 руб.

Для справедливости отметим, что в проведенной выше оценке техногенного ущерба был игнорирован косвенный ущерб и не учитывался синергетический эффект совместного действия различных поражающих факторов. Ведь в данном примере возможно одновременное наступление нескольких форм разрушительного воздействия (барическое, дробящее и метательное), не говоря уже об их проявлении, допустим, в совокупности с эффектом воздействия тех АХОВ, которые могли использоваться в данном цехе.

Необходимость учета подобного эффекта при оптимизации решений по снижению риска техногенных чрезвычайных ситуаций потребует определенной модификации только что рассмотренных моделей и методов. Однако при приближенных оценках параметров зон трансформации и разрушительного воздействия поражающих факторов можно ограничиться либо простой суперпозицией их разрушительного эффекта, либо последовательным определением соответствующих параметров и выбором из них наиболее существенных. Именно это и было рекомендовано методикой из параграфа 13.3.

Заканчивая параграф, приведем ряд статистических данных, необходимых для проверки достоверности результатов модельной оценки параметров исследуемого здесь процесса причинения техногенного ущерба. Например, на производственных объектах США зарегистрированы следующие данные о средней численности погибших: в результате одного взрыва — 26 и пожара — 35 человек. И наконец, данные о средней стоимости издержек (млн долл.) от одного крупного техногенного происшествия в современной России: а) авария на заводах: нефтеперерабатывающий — 45, нефтехимический — 47, газоперерабатывающий — 55; б) пожар — 36, взрыв — 33, объемный взрыв облака ТВС — 60; в) разгерметизация с выбросом АХОВ: из магистрального трубопровода — 47, стационарного резервуара — 42, реактора химического — 68, морского судна — 35, компрессора большой мощности — 29 и нагревательного котла — 18 млн долл.

## 15.4. Особенности прогноза ущерба здоровью людей от воздействия вредных химических веществ

Наряду с изложенными выше подходами представляется важным рассмотреть также особенности прогнозирования ущерба от аварийных и иных выбросов вредного вещества, проявляющегося не мгновенно, а с учетом их динамики и по истечении некоторого времени. Естественно, что для этого потребуется как можно более точная априорная оценка полученной ингаляционной токсодозы химических веществ, а в ряде случаев — и экспозиционной мощности дозы радиоактивного облучения. Соответствующий прогноз можно провести с помощью моделей, связывающих эти дозы с параметрами концентрационного поля и временем его существования или воздействия на людей.

При оценке размеров зон загрязнения токсичными веществами и вероятности поражения человека следует руководствоваться длительностью ( $\tau = t_k - t_n$ ) их воздействия от момента времени  $t_n$  его начала до конца  $t_k$ , а также их концентрацией в конкретной точке  $r(x, y, z)$  в текущий момент времени  $t$ . Как известно, эта концентрация  $c(r, t)$  будет являться функцией двух основных параметров: а) расстояния между источником загрязнения и месторасположением людей (между точками  $r'$  и  $r$ ); б) длительности времени  $t$  с момента  $t_n = t_0$  выброса вредного вещества либо с начала  $t_n = t_1^*$  его адсорбции или ингаляции.

Последнее означает, что ниже будут использованы следующие обозначения интервалов времени: а)  $\tau = t - t_0$  — для оценки текущих параметров поля концентрации и б)  $\tau^* = t_2^* - t_1^*$  — при расчете либо токсонагрузок в пятне загрязнения вредным веществом, либо токсодоз, полученных оказавшимися там без средств защиты людьми. Учитывая, что при  $t_n = t_0 = t_1^* = 0$  имеет место равенство  $\tau$  и  $t$ , смысл используемых в последующем символов  $\tau$ ,  $t$ ,  $t_n$  и  $t_k$  будет непосредственно уточняться в каждом конкретном случае.

Меру возможности поражающего воздействия вредных веществ на людей (вероятность  $Q_{ab}^I$  или  $Q_v$  причинения ущерба заданной степени тяжести либо процент их гибели) целесообразно оценивать двумя способами, отличающимися числом учитываемых факторов, а значит, и достоверностью. Предварительно кратко охарактеризуем каждый из них, обратив внимание на то, что оба эти способа основываются на расчете экспозиционных доз  $DP(r, \tau)$  и использовании рассмотренных ранее (см. параграф 15.1) зависимостей типа «доза — эффект».

*Первый* (менее точный) способ базируется на уравнении (15.5), предполагающем стационарность концентрации вредного вещества:

$c(r, t) = C = \text{const}$  и оценивающим мощность поглощенной токсодозы по упрощенной формуле  $DP = C^n \tau$ . Показатель степени  $n$  и коэффициенты  $a$  и  $b$ , используемые в этом случае для расчета  $Pr(DP)$ , совместно со смертельно опасными концентрациями некоторых веществ —  $LC_{50}$  ( $ppm, \tau$  — мин) даны в табл. 15.9.

Таблица 15.9. Параметры токсичности некоторых химических соединений

Вещество	$n$	$a$	$b$	$LC_{50}$
Акролеин	1	-9,93	2,049	304
Акрилонитрил	1,43	-29,42	3,008	—
Аммиак	2	-35,90	1,85	6164
Бензол	2	-109,78	5,3	—
Бромистый метил	1	-56,81	5,27	—
Диоксид азота	2	-13,79	1,4	235
Диоксид серы	1	-15,67	2,1	—
Метилизоцианат	0,653	-5,64	1,637	57
Окись пропилена	2	-7,41	2,1	—
Сероводород	1,43	-31,42	3,008	987
Соляная кислота	1	-16,85	2	—
Толуол	2,5	-6,79	0,408	—
Угарный газ	1	-37,98	3,7	7949
Формальдегид	2	-12,24	1,3	—
Фосген	1	-19,27	3,686	14
Фтористоводородная кислота	1	-35,87	3,354	802
Хлор	2	-8,29	0,92	1017
Четыреххлористый углерод	2,5	-6,29	0,408	3940

В отличие от первого, второй (более точный) способ учитывает реальную нестационарность концентрационного поля в зоне рассеяния вредного вещества, в том числе и по причине различной динамики его выброса из точки  $r'$  расположения источника. При реализации этого метода уже необходимо использовать две прогнозные модели: одна — для изменяющегося поля концентрации, а другая — для поглощенной вредной дозы.

Что касается меняющейся концентрации вредного вещества, например вследствие эпизодичности работы источника его мгновенных выбросов на интервале времени  $t \in [0; T]$ , то для прогноза характера ее влияния разумно использовать базовые соотношения (14.45), (14.46). Однако при этом следует различать два периода времени: а) до момента  $t' = t_0 = 0$  повторного выброса вещества; б) в течение



времени  $T$  после него. Тогда, используя принцип суперпозиции для текущего момента времени  $t$  и продолжительности рассматриваемого периода, можно записать следующие два выражения для поля концентрации в каждый такой период:

$$c(r, t) = \begin{cases} m \int_0^t G(r, r', t-t') dt', & 0 < t < T; \\ m \int_{t-T}^t G(r, r', t-t') dt', & t \geq T, \end{cases} \quad (15.16)$$

где  $m$  — интенсивность выброса вредного вещества в единицу времени, кг/с;  $G(r, r', t-t')$  — функция его метеорологического разбавления в атмосфере, характеризуемая следующим аналитическим выражением [10]:

$$G(r, r', t-t') = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x} [u_x(t-t')]} \exp\left(-\frac{[x-x'-u_x(t-t')]^2}{2\sigma_x^2 u_x(t-t')}\right) \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y} u_x(t-t')} \exp\left(-\frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2 u_x(t-t')}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z} u_x(t-t')} \times \\ \times \left[ \exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2 u_x(t-t')}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma_z^2 u_x(t-t')}\right) \right]. \quad (15.17)$$

Аналогично определяется и токсодоза, поглощенная человеком. Однако в отличие от предыдущего случая здесь следует различать уже другие две ситуации: 1) когда  $t_x^* < T$ , т.е. поглощение вредного вещества реципиентом заканчивается при еще работающем источнике выброса, 2) если это имеет место несколько позже, т.е. при  $t_x^* \geq T$ . Введя подстановку  $\lambda = t - t'$  и приняв  $t_x^* = 0$ , для каждой такой ситуации можно получить следующие два уравнения:

$$D_1(r, t) = m(t_{k1} - t_n) \int_0^{t_n} G(r, r', \lambda) d\lambda + \int_{t_n}^{t_{k1}} G(r, r', \lambda) (t_{k1} - \lambda) d\lambda; \quad (15.18)$$

$$D_2(r, t) = m \int_0^{t_n} G(r, r', \lambda) (T - t_n + \lambda) d\lambda + mT \int_{t_n}^{t_{k2}-T} G(r, r', \lambda) d\lambda + \\ + m \int_{t_{k2}-T}^{t_{k2}} G(r, r', \lambda) (t_{k2} - \lambda) d\lambda. \quad (15.19)$$

Проиллюстрируем конструктивность полученного результата на примере сравнительной оценки доз, поглощенных людьми при

выбросе в атмосферу одного и того же количества  $M$  вредных веществ за одинаковое время  $\tau \in [0; t_k]$ , но при разной динамике их выброса. При этом, используя формулы (15.16), целесообразно рассмотреть два важных случая: а) аварийный выброс произошел практически мгновенно; б) имело место непрерывное истечение таких веществ с постоянной интенсивностью  $m = M/\tau$ .

Оказывается, что для мгновенного выброса полученная кем-то вредная доза  $D_3(r, t)$  всегда превышает на величину  $\Delta D > 0$  соответствующее значение  $D_H$  от непрерывно действующего источника. При этом их разница определяется по следующим формулам:

$$D_3(r, t) = D_H(r, t) + \Delta D; \quad \Delta D = M/t_k \int_0^{t_k} G(r, r', \lambda)(t_k - \lambda) d\lambda. \quad (15.20)$$

Последние соотношения справедливы для любых источников вредных выбросов и функций метеорологического разбавления, в том числе для всех тех моделей их распространения, которые были ранее рассмотрены в данном разделе настоящего учебника.

Попутно заметим, что для оценки риска, связанного с вредными выбросами в атмосферу, недостаточно знания усредненных величин  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$ , так как нужен более точный прогноз характера воздействия токсичных и радиоактивных веществ на живые организмы. Ведь величина реально поглощенных ими доз за конкретное время зависит от интенсивности физической нагрузки (объема зараженного воздуха, прошедшего через органы дыхания), а их разрушительный эффект — от возраста и состояния здоровья. Более подробные сведения о влиянии этих и других факторов можно найти в работах [6, 13, 27, 39, 49].

Приведем также эмпирически найденные пропорции между различными исходами массового отравления людей парами токсичных веществ. Установлено, например, что доля легко пострадавших обычно составляет примерно 65%; получивших отравления средней и тяжелой степени — около 30%, а смертельный исход наблюдается приблизительно у 5% людей, оказавшихся под вредным воздействием этих веществ. Общее же число  $Ч_H$  пострадавших иногда рассчитывается по следующей приближенной эмпирической формуле:

$$Ч_H = K_{\text{вв}} I_c Ч, \quad (15.21)$$

где  $K_{\text{вв}}$ ,  $I_c$  — количество высвободившегося токсичного вещества, кг, и присвоенный ему индекс смертности (табл. 15.10) соответственно;  $Ч$  — число людей, оказавшихся в зоне воздействия газов или паров конкретного вредного вещества, чел.

Как следует из данной таблицы, значения индексов смертности для сернистых соединений и метилизоцианида отличаются в несколько

Таблица 15.10. Индексы смертности  $I_c$  некоторых вредных веществ

Вещество	Индекс	Вещество	Индекс	Вещество	Индекс
Сернистый газ	0,04	Фосген	0,50	Сероводород	0,07
Метилизоцианид	12,5	Хлор	0,18	Аммиак	0,18

сот раз. Причина подобного расхождения обусловлена сформировавшимися у людей эволюционными защитными механизмами в первом случае и отсутствием таковых — во втором, что особенно ярко проявилось в упомянутой выше (см. параграфы 6.1 и 6.2) трагедии в индийском городе Бхопале.

## 15.5. Особенности оценки экономического ущерба от воздействия опасных факторов на объекты фауны и флоры

В заключение данной главы отметим специфику количественной оценки ущерба тем *природным* ресурсам, которые могут располагаться в районе различных вредных выбросов. Как и ранее, для этого воспользуемся выражениями (13.3), (13.4), а в качестве параметра плотности  $F$  имеющих конкретные биоресурсов будем использовать удельную численность:

а) для наземных экосистем — позвоночных и беспозвоночных (включая почвенные) представителей фауны, а также деревьев, кустарников и растительности наземного яруса;

б) для водных — высших водорослей, водных позвоночных и донных беспозвоночных, а также зоо- и фитопланктона.

Идея расчета ущерба от гибели фауны и флоры основана на учете снижения *энергонасыщенности* соответствующих экосистем и изменения потоков энергии:  $I$  — входящей и  $E$  — выходящей через те их трофические уровни, которые показаны на рис. 15.4. Саму же энергонасыщенность можно оценивать, руководствуясь энергопродуктивностью уничтоженных биоресурсов, а стоимость утилизируемой ими энергии целесообразно приравнивать затратам на ее получение другими, экологически чистыми способами (например, 1 Вт от солнечных электробатарей ныне стоит 4—5 долл., а один кВт·ч — около 30 центов).

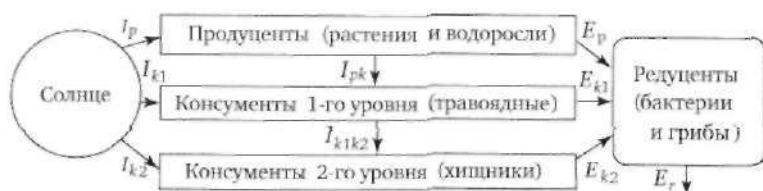


Рис. 15.4. Схема потоков энергии через экосистему

Для определения энергонасыщенности уничтоженной биоты необходимо располагать следующими исходными данными: средняя масса тела одной особи —  $M_k$ , кг; энергетическое содержание накопленного ею вещества —  $q_k$ , кДж/кг; скорость  $V_k$ , кг/год, оборота или регенерации этой биомассы; энергия  $E_k$ , кДж/год, ее существования (интенсивность дыхания, поддержания жизнедеятельности); трофические уровень или специализация —  $j$ , а также коэффициенты  $U_j$  утилизации энергии на всех трофических уровнях.

При этом стоимости  $C_k$  — биотических природных ресурсов  $k$ -го вида или  $C_t$  — покрытой ими единицы территории (акватории) могут рассчитываться по следующим формулам [21]:

$$C_k = G_k V_k + E_k / \prod_{j=1}^k U_j; \quad C_t = \sum_{i=1}^n C_i D_i, \quad (15.22)$$

где  $G_k$  — энергосодержание погибшей биоты, кДж;  $C_i$  — эквивалентная цена единицы соответствующей биомассы или особи, кДж;  $D_i$  — их плотность в зоне поражения (1/га или 1/км<sup>2</sup>).

При оценке ущерба подобным образом следует помнить, что параметры последних формул рассчитываются с учетом временного лага, необходимого для восстановления поврежденной биоты. Кроме этого, нужно руководствоваться следующими рекомендациями.

1. Величина  $G_k$  энергосодержания (кДж/кг) биоособей определяется по массе  $M_k$  и удельной теплоемкости  $q_k$  вещества их тела (см. табл. Е.2 из приложения к настоящей книге):

$$G_k = q_k M_k. \quad (15.23)$$

2. Скорость  $V_k$  естественного кругооборота биомассы в экосистеме может считаться обратно пропорциональной среднему времени генерации соответствующих особей и примерно равной одной трети от максимальной продолжительности  $\tau_k$  их жизни (с):  $V_k = 0,3\tau_k$ . В отсутствие достоверных данных о величине  $\tau_k$  максимальная длительность жизни млекопитающих и птиц рассчитывается по следующим формулам:

$$\tau_{км} = 366 \cdot 10^6 M^{0,2}; \quad \tau_{кп} = 894 \cdot 10^6 M^{0,19}. \quad (15.24)$$

3. Энергия существования животных  $E_{кж}$  и растений  $E_{кр}$  зависит от массы конкретных особей, а для большинства теплокровных животных она примерно вдвое выше уровня  $Y_{кж}$  их основного теплообмена в термонейтральных условиях. При этом их величины равны

$$E_{кж} = 2Y_{кж}; \quad Y_{кж} = cM^J, \quad (15.25)$$

где  $c, d$  — коэффициенты аллометрического уравнения (см. табл. Д.3 в приложении).

Для растений лесной экосистемы оценку величины  $E_{кр}$  следует проводить по затратам энергии на поглощение диоксида углерода и выделение кислорода, в предположении что их годовая продукция составляет 5% от общей биомассы подобной растительности, которая рассредоточена следующим образом: в стволах — 40%, в ветвях и листьях — 35%, под землей — 25%. В пересчете на один кубометр древесины значение данного параметра можно принимать равным

$$E_{кр} = 0,026688\rho, \quad (15.26)$$

где  $\rho$  — плотность условно сухой древесины, определяемая по табл. Д.4 приложения.

4. Коэффициент  $U_j$  утилизации энергии для большинства плотоядных и зерноядных животных можно принимать равным 0,8, тогда как для травоядных его значение будет 0,6.

В заключение остановимся на рассмотрении одного из способов оценки ущерба природной среде непрерывными вредными выбросами. В настоящее время его можно приравнивать к компенсационным выплатам администрации ОПО за конкретный расчетный период с учетом установленных лимитов. В случае превышения лимита предельно допустимых выбросов в атмосферу и гидросферу величина подобных выплат  $S_1$  принимается равной

$$S_1 = \sum_{t=1}^T S_t / \sum_{t=1}^T S_{dl}, \quad (15.27)$$

где  $T$  — продолжительность планового периода, годы;  $S_t$  — затраты, руб., на снижение вредных выбросов в текущем году;  $S_{dl}$  — лимит затрат, установленный с учетом заданного объема и предельно допустимых концентраций выбрасываемого вещества в атмосферном воздухе или воде.

При превышении объема предельно допустимых выбросов издержки  $S_2$ , руб., администрации ОПО рассчитываются следующим образом:

$$S_2 = S_{jt} / dM_{jt}, \quad (15.28)$$

где  $S_{jt}$  — затраты администрации на снижение вредных выбросов до установленного лимита, руб./год;  $dM_{jt}$  — их плановый объем в текущем году.

На этом завершим изложение особенностей прогнозирования и оценки техногенного ущерба, причиненного биологическим ресурсам аварийными и иными вредными выбросами. Подводя предвари-

тельные итоги, отметим, что предложенные подходы могут быть применены для обоснования рациональных решений в рамках соответствующего менеджмента.

Закачивая же данную главу и второй раздел настоящей книги в целом, отметим довольно большую трудоемкость и невысокую пока достоверность априорной количественной оценки техногенного ущерба, что обусловлено колоссальным числом влияющих на него факторов. Несмотря на это, внедрение в практику подобных моделей и методов будет способствовать заблаговременному прогнозу соответствующих издержек (хотя бы приближенному), без чего невозможен сколь-нибудь эффективный менеджмент техногенного риска.

## Вопросы и задания для самопроверки

1. Поясните, в чем заключается принципиальная трудность точного прогноза величины возможного техногенного ущерба.
2. Как сказывается принципиальная трудность точного прогноза на выборе соответствующих моделей и методов?
3. Какими способами в настоящее время принято компенсировать дефицит исходных данных, необходимых для точных моделей и методов прогноза ущерба?
4. Что означают термины «пробит-» и «эрфик-функции» и где они применяются?
5. На какие особенности следует обращать внимание при использовании пробит- и эрфик-функций?
6. Можно ли применять аппарат пробит- и эрфик-функций для нормирования безопасности в техносфере?
7. Укажите область применения коэффициентов пробит-функции и каким образом они могут быть определены.
8. Известны ли вам другие (невероятностные) способы априорной оценки причинения конкретного ущерба материальным ресурсам?
9. Что означает измерение материального ущерба в категориях относительной стоимости?
10. Укажите, каким образом можно перейти от денежного выражения ущерба к его измерению единицами социального времени.
11. Насколько оправдан существующий ныне способ аналитического выражения пробит-функции по формуле (15.3)?
12. В чем состоит преимущество альтернативного выражения (15.4)?
13. Если альтернативное выражение (15.4) лучше, то почему оно пока практически не применяется?
14. Почему степенное аналитическое выражение поглощенной токсодозы не гарантирует от ошибочного прогноза?

15. Нужно ли учитывать динамику выброса вредного вещества при прогнозе поглощенной токсодозы или достаточно знать лишь одну его массу?
16. Каким образом можно судить о достоверности прогноза ущерба в смысле его величины и распределения по степени тяжести?
17. В каких формах проявляются последствия причинения ущерба отдельным представителям биоты и биологическим видам?
18. На чем основана идея оценки стоимости ущерба от гибели конкретных биоособей?
19. Какие основные факторы и параметры следует учитывать при прогнозе ущерба, связанного с гибелью биоособей?
20. Каким способом ныне принято оценивать ущерб, причиняемый непрерывными вредными выбросами объектов техносферы?

**Ситуационная задача.** Вообразите ситуацию, когда вы оказались участником дискуссии, в которой обсуждались сильные и слабые стороны прогноза параметров ущерба вероятностным и детерминистским методами. Приведите свои доводы по данному аспекту, понимая под оцениваемыми параметрами размер и вероятность причинения ущерба, допустим, какому-либо зданию или человеку.

## Литература

### Основная

1. Безопасность России. Анализ риска и проблем безопасности : в 3 ч. — М. : Знание, 2006.
2. Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П. Г. Белов. — М. : Академия, 2003.
3. Белов, П. Г. Менеджмент техногенного риска. Теоретические основы / П. Г. Белов. — Германия : Lambert Academic Publishing, 2011.
4. Губинский, А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем / А. И. Губинский. — Л. : Наука, 1982.
5. Ивин, А. А. Логика : учеб. пособие для бакалавров / А. А. Ивин. — 3-е изд. — М. : Юрайт, 2013.
6. Мастрюков, Б. С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях / Б. С. Мастрюков. — М. : Академия, 2012.
7. Можяев, А. С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование систем : учебник / А. С. Можяев. — СПб. : ВМА им Н. Г. Кузнецова, 2006.
8. Надежность и эффективность в технике. Справочник : в 10 т. — М. : Машиностроение, 1987.
9. Основы инженерной психологии / под. ред. Б. Ф. Ломова. — М. : Высшая школа, 2011.
10. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска / В. Г. Горский [и др.]. — М. : Экономика и информатика, 2002.
11. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем «АРБИТР». Свидетельство об официальной регистрации № 2003611101. Аттестационный паспорт № 222 от 21 февраля 2007 г.
12. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. — СПб. : Изд-во СПбГУ, 2007.
13. Сафонов, В. С. Теория и практика оценки риска в газовой промышленности / В. С. Сафонов, Г. Э. Одишария, А. А. Швыряев. — М. : ВНИИГАЗ ; Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 1996.
14. Справочник по надежности : пер. с англ. — М. : Мир. 1969 (Т. 1) ; 1970 (Т. 2, 3).
15. «Токси + Risk». Программный комплекс прогнозирования последствий выбросов вредных и аварийно химически опасных веществ». Руководство пользователя. — М. : НТЦ Промышленная безопасность, 2012.



16. Хенли, Д. Надежность технических систем и оценка риска : пер. с англ. / Д. Хенли, Х. Кумамото. — М. : Машиностроение, 1984.
17. Филипс, Д. Методы анализа сетей : пер. с англ. / Д. Филипс, А. Гарсия-Диас. — М. : Мир, 1984.

### Дополнительная

18. Ахьюджа, Х. Сетевые методы управления в проектировании и производстве : пер. с англ. / Х. Ахьюджа. — М. : Мир, 1979.
19. Бейкер, У. Взрывные явления. Оценка и последствия : пер. с англ. / под ред. Я. Б. Зельдовича, Б. У. Гельфанда ; У. Бейкер [и др.]. — М. : Мир, 1986.
20. Белов, П. Г. Методологические основы национальной безопасности России : в 2 ч. / П. Г. Белов. — СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2004.
21. Большаков, В. Н. Новый подход к оценке стоимости биотических компонентов экосистем / В. Н. Большаков [и др.] // Экология. — 1998. — № 5. — С. 339—348.
22. Вентцель, Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. — М. : Наука, 1980.
23. Гвардейцев, М. И. Математическое обеспечение управления. Мера развития общества / М. И. Гвардейцев, П. Г. Кузнецов, В. А. Розенберг. — М. : Радио и связь. 1996.
24. ГОСТ Р 50779.10—2000 (ИСО 3534.1—93). Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.
25. ГОСТ 11.005—74. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров экспоненциального распределения и распределения Пуассона.
26. Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике : пер. с франц. / Д. Дюбуа, А. Прад. — М. : Радио и связь, 1990.
27. Егоров, А. Ф. Методы оценки рисков и негативных воздействий химически опасных объектов / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая. — М. : Изд-во РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011.
28. ИСО-704. 2000. Терминологическая работа. Принципы и методы.
29. Кернажицкий, В. А. Методы оценки безопасности эргатических систем при их создании и эксплуатации / В. А. Кернажицкий [и др.] // Вестник машиностроения. — 1983. — № 10. — С. 45—47.
30. Колмаков А.Г. Использование концепций системного подхода при изучении деформирования и разрушения конструкционных металлических материалов / А. Г. Колмаков // Нелинейный мир. — 2006. — Т. 4. — № 3. — С. 126—136.
31. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М. : Наука, 1973.
32. Макаркин, Н. П. Экономика надежности техники / Н. П. Макаркин. — М. : Экономика, 2001.
33. Матвиенко, Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения / Ю. Г. Матвиенко. — М. : Физматлит, 2006.
34. Махутов, Н. А. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин. — М. : Спектр, 2011.

35. Механика разрушения и прочность материалов : в 4 т. / под ред. М. П. Саврука. — Киев : Изд-во АН УССР, 1988.
36. Морозов, В. Н. Прогнозирование последствий аварийных взрывов / В. Н. Морозов // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — 1996. — № 10. — С. 72—84.
37. Оценка риска при перевозке опасных объектов, содержащих ВВ, и их перегрузке грузовым автокраном / Н. А. Билык [и др.]. — Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — С. 136—147.
38. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем : пер. с англ. / Дж. Питерсон. — М. : Мир, 1984.
39. Сафонов, В. С. Анализ и оценка реализуемости технических решений по производству и морской транспортировке СПГ. Отчет о НИР № 125/3 / В. С. Сафонов [и др.]. — М. : ВНИИГАЗ, 2009.
40. Справочник по инженерной психологии / под. ред. Б. Ф. Ломова. — М. : Машиностроение, 1982.
41. Теория управления: терминология / АН СССР. Комиссия по научно-технической терминологии. — М. : Наука, 1988. — Вып. 107.
42. Чебаненко, П. П. Эргономические приемы выявления резервов эффективности судовых систем / П. П. Чебаненко, Ю. Н. Шалаев. — Севастополь : ВСНТО, 1988.
43. Brilon, W. Konfidenzintervalle von unfalzzahlen / W. Brilon // Accident analysis and prevention. — 1973. — Vol. 5. — P. 321—341.
44. Ciannici, B. Socially acceptable level of risk: some quantitative consideration / B. Ciannici, M. Gakkuzo // Reliability engineering. — 1983. — № 5. — P. 37—45.
45. Cozzani, V. An Approach to the Assessment of Domino Accidents Hazard in Quantitative Area Risk Analysis / V. Cozzani, S. Zanelli // Journal of Hazardous Materials. — 2007. — Vol. 130. — P. 24—50.
46. Drenick, R. A mathematical organization theory / R. Drenick. — Acad. press, 1986.
47. Franzetti, C. Operation Risk Modeling and Management / C. Franzetti. — Taylor & Francis, 2011.
48. Gubinelli, G. Assessment of missile hazards: Evaluation of the fragment number and drag factors / G. Gubinelli, V. Cozzani // Journal of Hazardous Materials. — 2008. — Vol. 134. — P. 12—40.
49. Jensen, R. Risk-reduction Methods for Occupational Safety and Health / R. Jensen. — J. Willey & Sons, 2012.
50. Kitajima, H. Probabilistic safety evaluation of dynamic hazard propagation / H. Kitajima // IEEE transactions of reliability. — 1986. — Vol. 35. — № 1. — P. 78—84.
51. Pritsker, A. Modeling and analysis using Q-GERT networks / A. Pritsker. — J. Willey & Sons, 1977.
52. Singer, D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis / D. Singer // Fuzzy sets and systems. — 1990. — Vol. 34. — № 2. — P. 145—155.
53. Symons, M. A model for evaluation the effect of motor vehicle inspection programs / M. Symons, D. Reinfort // Accid. analysis and prev. — 1975. — Vol. 7. — № 3. — P. 36—42.

Наши книги можно приобрести:

Учебным заведениям и библиотекам:  
в отделе по работе с вузами  
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: vuz@urait.ru

Частным лицам:  
список магазинов смотрите на сайте [urait.ru](http://urait.ru)  
в разделе «Частным лицам»

Магазинам и корпоративным клиентам:  
в отделе продаж  
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru

Отзывы об издании присылайте в редакцию  
e-mail: red@urait.ru

**Новые издания и дополнительные материалы доступны  
в электронной библиотечной системе «Юрайт»  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

*Учебное издание*

**Белов Петр Григорьевич**

# **УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ, СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**Часть 2**

Учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры

Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Гарнитура «CharterITC». Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 15.63.

**ООО «Издательство Юрайт»**  
111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.  
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, [www.urait.ru](http://www.urait.ru)

**Электронная библиотека (ЭБС)**  
**издательства «Юрайт»**  
**www.biblio-online.ru**

**Платить только за необходимое!**



**Что продаем?**

- ✔ Учебники ведущих научных школ страны от издательства «Юрайт».
- ✔ Учебники по новым ФГОСам – для прикладного и академического бакалавриата.
- ✔ Модули по узким дисциплинам.

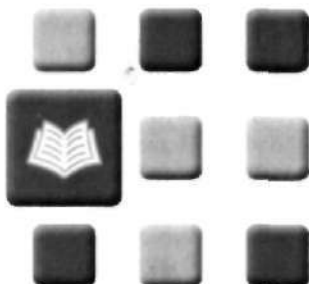
**Сколько стоит?**

- ✔ Вы можете выбрать только те учебники, которые нужны Вашим учащимся.
- ✔ Вы можете выбрать количество одновременных доступов к каждому учебнику.
- ✔ Издательство «Юрайт» поможет с подборкой учебников по Вашим дисциплинам.
- ✔ Один доступ к учебнику на год – в 5 раз дешевле печатного издания.



**Почему именно наша ЭБС?**

- ✔ Качественный контент для образования.
- ✔ Доступ к переизданиям в течение подписки.
- ✔ Доступ к архиву издательства.
- ✔ Сервисы для библиотек и преподавателей.
- ✔ Система поиска по всем метаданным.
- ✔ Система поиска по дисциплинам и синонимам.
- ✔ Передача данных в библиотечный каталог в формате RUSMARC.



**Издательство «Юрайт»**

111123, Москва, ул. Плеханова, д. 4а, бизнес-центр «Юникон»  
Тел./факс (495) 744-00-12; e-mail: vuz@urait.ru