

ГЛАВА 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИСШЕСТВИЙ С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММ ТИПА ДЕРЕВО

5.1. Правила построения дерева происшествия и дерева событий

Как уже упоминалось выше (см. разд. 4.3), самое широкое распространение в моделировании опасных техносферных процессов получили диаграммы причинно-следственных связей, имеющие ветвящуюся структуру и называемые деревом происшествия и деревом событий - исходов интересующих нас техногенных происшествий. Общая *процедура* моделирования и системного анализа процесса их появления, для априорной количественной оценки соответствующего ущерба обычно включает совокупность итераций, каждая из которых состоит из следующих этапов:

- 1) выбор опасного процесса и уточнение цели его исследования;
- 2) построение моделей типа дерево происшествия и дерево событий - его исходов;
- 3) проведение качественного анализа моделируемого процесса;
- 4) количественная оценка техногенного риска (величины среднего ущерба), ожидаемого от анализируемого происшествия;
- 5) обоснование мероприятий по снижению величины техногенного риска.

Рассмотрим подробнее особенности реализации второго и последующих этапов системного исследования и прогнозирования техногенного риска, полагая, что под выбором опасного процесса подразумевается определение состава и структуры человеко-машинной системы, используемой на производстве и транспорте, а также уточнение характера взаимодействия ее компонентов между собой и окружающей их средой.

Наиболее ответственным и сложным этапом системного анализа и моделирования техногенных происшествий, по свидетельству специалистов, является *построение* древовидных семантических моделей процесса возникновения происшествий и причинения ими ущерба людским, материальным и природным ресурсам. Это объясняется тем, что лишь адекватные реальности (деревья) позволят при последующем их анализе выявить все наиболее существенные предпосылки, количественно оценить как возможность появления происшествий, так и ожидаемый от них ущерб. Естественно, что без соблюдения этого условия немислим ни сколько-нибудь точный прогноз соответствующего риска, ни выработка оптимальных мероприятий по снижению сопутствующего ему техногенного ущерба.

Сложность данного этапа обусловлена отсутствием в настоящее время строгих формальных процедур его реализации, что иногда позволяет относить этот этап скорее к искусству (эвристике), чем к науке. По этой причине не удастся обеспечить абсолютной идентичности моделей одного и того же происшествия, построенных различными исследователями. А без этого трудно ожидать требуемой в научных исследованиях воспроизводимости тех результатов, которые получены с помощью диаграмм этого типа.

Для преодоления указанных препятствий предлагается способ формализации данной процедуры, основанный на использовании принятой выше энергоэнтропийной концепции. Данный способ базируется на двух ее утверждениях:

а) техногенные происшествия всегда связаны с нежелательным высвобождением, трансформацией, распространением и губительным воздействием потоков энергии или вещества на различные объекты, оказавшиеся под их влиянием;

б) любое такое происшествие является одновременно и результатом разрушительного выброса накопленного в техносфере энергозапаса, и следствием цепи соответствующих предпосылок.

Каждое из этих утверждений может быть использовано при создании диаграмм влияния. В частности, для дерева происшествия - второе, а для дерева его исходов - первое. Сформулируем наиболее общие *рекомендации*, пригодные вначале для моделирования обстоятельств возникновения техногенного происшествия в человеко-машинных системах, а затем и причинения ущерба от него в случае появления.

Из второго утверждения следует, что при определении структуры (элементов и связей) дерева происшествия нужно руководствоваться следующими соображениями. Во-первых, данная модель должна состоять из одного, головного события – собственно происшествия (нежелательного высвобождения вещества или энергии) и множества предшествующих ему предпосылок – ошибок людей, отказов техники и неблагоприятных для них внешних воздействий. Во-вторых, в состав этого дерева следует включать все те логически условные и безусловные связи между такими предпосылками, соблюдение которых необходимо и достаточно для возникновения неконтролируемого выброса энергозапаса.

Рекомендуется также использовать не прямую, а обратную последовательность прогнозирования предпосылок и условий, в совокупности приводящих к появлению моделируемых происшествий. Иначе говоря, построение дерева происшествия следует начинать не снизу вверх (от исходных ошибок, отказов и опасных внешних воздействий - к головному событию), а наоборот. При этом само головное событие, соответствующие ему предпосылки верхнего и последующих уровней, а также образованные ими причинные цепи необходимо выявлять *дедуктивно* - на основе знания общих закономерностей возникновения техногенных происшествий и особенностей их проявления в конкретных обстоятельствах.

При выявлении факторов, способствующих появлению происшествий в техносфере, нужно помнить, что основными носителями опасности в ней служат токсичные и взрывоопасные вещества, источники электромагнитных полей и ионизирующих излучений, движущиеся предметы и сосуды, работающие под высоким давлением. Следовательно, выявление возможных происшествий необходимо увязывать с логикой нежелательного высвобождения накопленной там энергии и вещества. А вот старение, загрязнение, увлажнение, перегрев и переохлаждение соответствующих элементов технологического оборудования по естественным причинам или в результате неблагоприятных воздействий нужно

считать техническими предпосылками к возможным техногенным: авариям и катастрофам.

Другой важной группой предпосылок к происшествиям в человеко-машинных системах следует считать ошибочные действия, непроизвольно или умышленно допущенные людьми при конструировании, изготовлении, монтаже, техническом обслуживании и ремонте техники. При прогнозировании подобных предпосылок (в том числе трудно предсказуемых несанкционированных действий человека) нужно помнить, что все они могут быть обусловлены:

а) внутренними причинами - отсутствием должных психологических установок, знаний и навыков;

б) внешними для человека факторами - несовершенством используемых им оборудования и технологии, высокой напряженностью труда или неблагоприятными условиями рабочей среды.

Наиболее целесообразная последовательность построения дерева происшествия показана на рис. 5.1 в виде соответствующей блок-схемы. Она базируется на рекомендованном выше - дедуктивном - способе выявления условий возникновения исследуемого опасного события (неконтролируемого выброса энергии или вещества). При этом построение данного дерева рекомендуется осуществлять сверху вниз - от головного события к причинным цепям предпосылок (ветвям этого дерева, состоящим из ошибок персонала, отказов техники и нерасчетных для них внешних воздействий), тогда как листьями такой модели - считать перечисленные выше и другие факторы.

При использовании рассматриваемой блок-схемы, полезно руководствоваться следующими основными *правилами*:

- 1) как можно четче определять условия появления головного события;
- 2) декомпозировать все сложные события-предпосылки;
- 3) уточнять время, место и причины возникновения каждой из них;
- 4) выявлять совместно действующие факторы и разделять их;
- 5) учитывать возможность обратных связей между отдельными элементами дерева;
- 6) увязывать события - инициаторы причинных цепей с внешними факторами;
- 7) проверять достоверность всех допущений и исходных данных.

Построение дерева происшествия должно заканчиваться проверкой полноты образующих его событий и связей между ними. В ряде случаев на этом этапе моделирования проводят также дальнейшую формализацию полученной семантической модели - вводят буквенное или цифровое кодирование всех ее элементов, необходимое для их увязки по правилам алгебры событий (см. формулу (4.3)). Использование таких кодов в качестве индексов событий, а символов «8», «+» - для обозначения их логического перемножения и сложения облегчает качественный и количественный анализ диаграммы типа дерево происшествия.

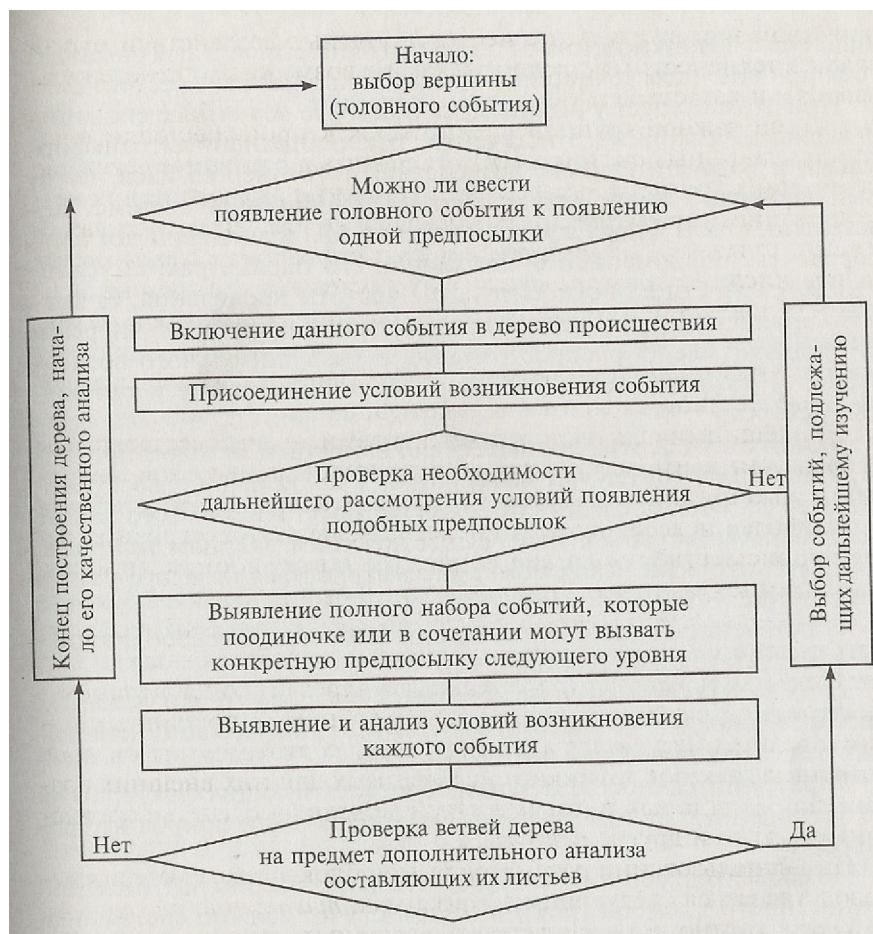


Рис. 5.1. Последовательность построения дерева происшествий

В завершение этого раздела укажем на особенности построения дерева событий (исходов моделируемых выше происшествий) и выдадим *рекомендации*, касающиеся проверки адекватности такой диаграммы интерпретируемому ей процессу. Прежде всего, отметим, что данная модель также должна строиться сверху вниз, от центрального события к ветвям, олицетворяющим возможные формы и способы причинения ущерба различным ресурсам. В качестве ее центрального события целесообразно рассматривать головное события конкретного дерева происшествий, что обеспечивает системность анализа всего рассматриваемого здесь процесса, начинающегося с возникновения отдельных предпосылок и завершающегося причинением техногенного ущерба конкретным ресурсам*.

При этом следует учитывать все наиболее вероятные сценарии и варианты аварийного истечения, распространения, трансформации и разрушительного воздействия того энергозапаса, который накоплен в соответствующей человеко-машинной системе. Желательно, чтобы в последующем каждый такой сценарий мог быть обеспечен информацией о следующих его параметрах: а) условные вероятности или относительные частоты проявления; б) высвободившиеся массы вредного вещества или количество энергии; в) площади зон их распространения и разрушительного воздействия; г) находящиеся в них людские, материальные и природные ресурсы.

В отличие от дерева происшествий основным методом прогноза таких вариантов служит не дедукция, а *индукция*; т. е. воспроизведение всех тех

последствий, которые могут иметь место как не противоречащие объективно существующим законам природы. Каждый подобный исход может рассматриваться не менее чем на трех этапах:

1) истечение потоков энергии или вещества, высвободившихся в результате происшествия;

2) их распространение от источника выброса до близлежащих ресурсов, иногда - с учетом возможной трансформации некоторых веществ в новой для них среде;

3) разрушительное воздействие соответствующих факторов на не защищенные от них людские, материальные и природные ресурсы.

Из вышеизложенного следует, что дерево событий (исходов техногенного происшествия) в общем случае должно состоять из трех *уровней*. На первом уровне рассматривается количество высвободившегося вредного вещества или энергии, каждое - со своей вероятностью. Основными учитываемыми здесь параметрами следует считать: накопленные их запасы, включая кинетическую и потенциальную энергию тела человека; возможность ограничения утечки вещества или снижения потенциала энергии предусмотренными для этого приборами безопасности; гидравлическое и электрическое сопротивление каналов утечки и наполняемой потоками среды.

Второй уровень дерева исходов интерпретирует особенности неконтролируемого распространения и трансформации высвободившихся потоков энергии и вредного вещества. При этом учитывается как возможное их преобразование в новой среде (например, мгновенный взрыв, интенсивный пожар или постепенное испарение пролитого сжиженного газа), так и появление новых источников опасности, сопутствующих такой трансформации токсичных веществ, теплового импульса, избыточного давления других поражающих факторов. Естественно, что существенными характеристиками здесь являются взрывоопасность, токсичность или инертность высвободившихся потоков энергии и вещества, а также плотность, метеоусловия, рельеф местности и иные параметры среды их вероятного распространения.

Наконец, на третьем уровне прогнозируется разрушительная работа высвободившихся потоков и сопутствующих им факторов, совершаемая с объектами, оказавшимися в зоне их воздействия.

Здесь рассматривается не только непосредственный ущерб людям, их имуществу и природной среде, но и косвенный, обусловленный нарушением производственных и естественных - природных связей между ними. Размеры совокупного ущерба определяются с учетом уровней поражающих факторов в соответствующих зонах, плотности и стойкости подвергнутых их вредному воздействию ресурсов, поглощенных ими доз энергии и вредного вещества, своевременности проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ.

Построение дерева событий - исходов техногенного происшествия - завершается последовательной проверкой полноты рассмотренных вариантов истечения, распространения, трансформации и поглощения высвободившихся потоков. При этом следует руководствоваться правилами определения и деления

понятий на классы, рекомендуемыми формальной логикой и теорией вероятностей для независимых и зависимых событий. Соблюдение этих правил обеспечит адекватность полученной семантической модели реальным условиям причинения ущерба, а стало быть, и ее пригодность для последующего анализа исследуемого опасного процесса в техносфере.

5.2. Качественный анализ моделей типа дерево

Важным достоинством моделирования происшествий с помощью диаграмм типа дерево является, как указывалось выше, возможность обстоятельного и системного анализа интерпретируемых им процессов в техносфере. Вот почему после построения деревьев происшествия и его исходов обычно приступают к проверке их адекватности исследуемым опасным процессам, в том числе и путем качественного и количественного анализа полученных семантических моделей.

Начинают такой анализ с оценки правильности определения всех событий рассматриваемых здесь моделей (каждой предпосылки дерева происшествия и каждого исхода дерева событий). Прежде всего, проверяют наличие таких наиболее существенные признаков:

1) родовая принадлежность, например «гибель, увечье, временная потеря трудоспособности человека» - для различных исходов несчастного случая - или «отказ, ошибка, нерасчетное внешнее воздействие» - для предпосылок к нему; 2) межвидовые отличия внутри рода - соответственно «по причине удара или захвата человека движущими частями, ингаляции или адсорбции вредного вещества, и «вследствие износа, усталости, стихийного бедствия».

В наименовании всех предпосылок и исходов каждой рассматриваемой здесь модели нужно избегать использования неясных слов и так называемых ошибок типа «круг в определении», т. е. попыток выразить содержание определяемых понятий через самих себя (например, «потребность - это то, в чем нуждаешься, а нужда то, что требуется»). Наконец, для выявления причинно-следственных связей между событиями диаграмм типа дерево, следует руководствоваться принятыми в формальной логике методами: единственного сходства, единственного различия и их комбинацией, а также методами остатков и сопутствующих изменений.

После завершения проверки любой диаграммы типа дерево на правильность и полноту определения учитываемых событий, приступают к ее качественному анализу. Его основные задачи состоят обычно в выявлении закономерностей возникновения и снижения ущерба от техногенного происшествия, т. е. в выявлении в соответствующем дереве, например, тех предпосылок и их цепочек, реализация которых приводит к появлению либо к неоявлению его головного события, а также в количественной оценке вклада интересующих исследователя событий-предпосылок.

Рассмотрим последовательно особенности процедуры качественного анализа каждой рассматриваемой здесь диаграммы типа дерево.

Вначале займемся анализом дерева происшествия с помощью, так называемых минимальных сочетаний его исходных событий предпосылок.

Наиболее удобны для качественного анализа дерева происшествия *минимальные сочетания предпосылок*, под которыми подразумевается минимально необходимое и достаточное для достижения конкретного результата их множество. Естественно, что чаще всего интересуются двумя результатами: возникновением и предупреждением конкретного происшествия.

Поэтому при системном анализе процесса возникновения техногенных происшествий целесообразно иметь дело с двумя типами минимальных сочетаний - пропускным (аварийным) и отсечным (секущим). *Минимальное пропускное сочетание* (МПС) включает в себя наименьшее число тех исходных предпосылок дерева происшествия, одновременное появление которых достаточно для прохождения сигнала от них до головного события.

Напротив, *минимальное отсечное сочетание* (МОС) формирует условия не появления головного события. Это сочетание состоит из исходных событий рассматриваемого дерева, гарантирующих отсутствие происшествия, при условии невозникновения одновременно всех входящих в него событий - предпосылок. Особенностью же обоих типов минимальных сочетаний служит то обстоятельство, что они теряют присущие им свойства при удалении из каждого такого сочетания хотя бы одного события.

Выявление же подобных сочетаний удобно проводить сверху вниз, последовательно рассматривая условия, необходимые для прохождения (в МПС) или пересечения (в МОС) сигнала к головному событию от каждой предпосылки промежуточного уровня. Для иллюстрации качественного анализа моделируемых здесь опасных процессов в техносфере с помощью минимальных пропускных и отсечных сочетаний воспользуемся деревом происшествия, изображенным на рис. 5.2 и интерпретирующим те условия, которые необходимы и достаточны для возникновения несчастного случая, допустим, на электроустановке.

На данном рисунке показаны условия возможного поражения человека электрическим током. Предполагается, что головное для этой модели событие X явилось результатом одновременного наложения трех предпосылок верхнего уровня - появления потенциала высокого напряжения на корпусе электроустановки (1), нахождения человека на токопроводящем основании (Н) и его прикосновения к этому корпусу (κ).

В свою очередь, предпосылка I явилась следствием возникновения любого из двух других исходных событий A и B , например снижения сопротивления изоляции или касания токоведущими частями электроустановки ее корпуса по причине их раскрепления. Другая предпосылка промежуточного уровня H также могла быть обусловлена двумя исходными событиями: C - нахождением человека на металлическом полу или D - его касанием заземленных элементов здания; а предпосылка K - следствием одного из трех событий E , F и G , например, необходимостью ремонта, технического обслуживания или использования электроустановки по прямому назначению.



Рис. 5.2. Дерево происшествия на электроустановке

Заметим, что данная модель может имитировать условия появления и другого техногенного происшествия, в частности воспламенения паров водовода, выделяющихся из свинцовых аккумуляторов. Предпосылками промежуточного уровня в этом Случае будут: *I* - накопление этого газа в аккумуляторной станции, *H* - отсутствие в ней вентиляции и *K* - появление там источника воспламенения. В свою очередь, первая предпосылка – следствие длительного заряда неисправных аккумуляторных батарей (*A*) или отказа зарядных устройств (*B*); вторая - поломки вентиляторов (*C*) или закрытия воздухопроводов (*D*); третья - искрения электрооборудования (*E*), появления людей с открытым огнем (*P*) или их курения (*G*).

В действительности (что подтверждается и в данной модели) одно дерево происшествия может иметь несколько минимальных сочетаний предпосылок, необходимых и достаточных для реализации или недопущения его головного события. Среди них могут быть МПС и МОС, состоящие только из одного исходного события - синглеты, из двух - дуплеты, Из трех (триплеты) и более событий-предпосылок. Так, в дереве происшествия, приведенном на рис. 5.2, имеется 12 Минимальных пропускных сочетаний исходных событий-предпосылок: триплеты - *ACE*, *ACF* *ACG*, *ADE*, *ADF*, *ADG*, *BCE*, *BCF*, *BCG*, *BDE*, *BDF* *BDG* - и три минимальных отсечных сочетания таких события: дуплеты - *AB*, *CD* и триплет *EFG*.

Другим способом качественного анализа дерева происшествия, позволяющим уточнить вклад его конкретных предпосылок в появление и предупреждение головного события, является анализ значимости и критичности исходных событий - предпосылок. Соответствующие параметры могут использоваться: а) для установления приоритетности осмотра, технического обслуживания и профилактики того технологического оборудования, в котором могут возникнуть более опасные отказы; б) обоснования необходимости тщательного контроля ответственных алгоритмов деятельности персонала; в) контроля за важными параметрами рабочей среды; г) прогноза показателей безотказности и живучести создаваемой техники.

Оценка *значимости* любого события дерева происшествия основана на учете его объединения с другими предпосылками этой модели: чем *ближе* к ее вершине ощущается реализация события, тем больше его вклад в условия возникновения конкретного происшествия. А вот *критичность* уже свидетельствует о вкладе конкретной предпосылки в условия непоявления

головного события соответствующего дерева.

Например, в модели рис. 4.5, *a* более значима исходная предпосылка 1, так как ее появление, как бы доводит сигнал по левой ветви выше, чем событие 7. Напротив, предпосылка 7 более важна для предупреждения моделируемого происшествия, поскольку для этого достаточно непоявление ее одной. Заметим, что в отличие от данной модели, все исходные предпосылки рис. 5.2 одинаково значимы на качественном уровне.

В настоящее время также используются количественные критерии оценки значимости и критичности, обычно характеризующие вероятность или ожидаемое число наступлений головного события за некоторое время. Как правило, одни из них указывают на изменение этих параметров вследствие появления либо непоявления конкретных предпосылок и образуемых ими минимальных сочетаний. Другие - на ожидаемое среднее число происшествий, обусловленных такими событиями и их совокупностями за конкретный период.

Самым предпочтительным (среди известных ныне показателей значимости) считается критерий Фусселя - Везели, измеряемый вероятностью того, что конкретное исходное событие или минимальное сочетание предпосылок дерева происшествия способствуют появлению его головного события. Значение критерия - Λ_i^{FV} , определяемое при условии невозникновения исследуемого происшествия до момента реализации исходной предпосылки или сочетания, рассчитывается по следующим формулам:

$$\Lambda_i^{FV} = P_i(\tau) / Q(\tau); \quad \Lambda_i^{FV} = \left[\sum_{k=1}^n P_k^*(\tau) \right] / Q(\tau), \quad (5.1)$$

где $P_i(\tau)$, $Q(\tau)$ - соответственно вероятности наступления предпосылок и возникновения головного события дерева происшествий за некоторое время τ ; P_k^* - вероятности событий, принадлежащих конкретному минимальному пропускному сочетанию; n - число таких событий в этом сочетании.

Известны и другие показатели, используемые для оценки значимости исходных событий и образуемых ими причинных цепей предпосылок к происшествию. В частности: а) показатель Бирнбаума Λ_i^B , рассчитываемый либо взятием частной производной от $Q(\tau)$ по $P_i(\tau)$, либо как разность между вероятностями головного события до и после появления интересующих нас событий или их подмножеств; б) Барлоу - Прошана - Λ_i^{BP} , равный среднему числу происшествий, ожидаемому из-за возникновения оцениваемых исходных предпосылок.

Говоря об особенностях оценки значимости и критичности элементов дерева происшествия, следует обратить внимание на корректность использования двух последних количественных критериев, иногда дающих неправдоподобные рекомендации. Дело в том, что их значения зависят не только от вероятности предпосылок, но и от способа их соединения логическими условиями данного дерева. Поэтому могут быть ситуации (например, при непродолжительной работе многократно резервированных технических систем), когда большую значимость вначале имеют наиболее надежные их элементы, а затем - самые ненадежные.

Особый *интерес* критерии значимости и критичности исходных предпосылок представляют для выбора первоочередных мер по снижению техногенного риска. При прочих равных условиях наибольшую эффективность или экономию средств обеспечивают те из них, которые воздействуют на самые значимые или критичные события. В частности, из рис. 4.5, а нетрудно видеть, что снижение вероятности появления исходных предпосылок 1 и 7 на одну и ту же относительную величину окажется менее значимым для второй из них - за счет перемножения ее (меньшей единицы) вероятности на такие же значения параметров других (соседних с событием 7) предпосылок.

Дополнительную информацию об особенностях практического применения известных критериев оценки значимости и критичности можно получить в работе [36]. Примеры же качественного анализа дерева происшествия с помощью минимальных сочетаний каждого типа и рассмотренных выше показателей значимости приведены в конце этой главы.

В завершение данного параграфа укажем ряд особенностей, касающихся качественного анализа *дерева событий* (возможных исходов конкретного техногенного происшествия). Прежде заметим, что до сих пор не разработаны исчерпывающие рекомендации, пригодные для обстоятельного проведения такого анализа. По крайней мере, пока не опубликованы процедуры, подобные только что рассмотренным.

С учетом данного обстоятельства и того, что процессу причинения техногенного ущерба посвящена часть III книги, здесь ограничимся лишь изложением правил проверки полноты событий этого дерева, а также приведем самые общие рекомендации по уточнению некоторых их признаков. Во-первых, обратим внимание на то, чтобы предпосылки каждого уровня дерева исходов происшествия в совокупности представляли полную группу несовместных событий.

Из этого следует, что в данном дереве должны быть учтены все возможные варианты: 1) истечения - $\{1, \dots, i, \dots, l\}$, 2) распространения и трансформации - $\{1, \dots, j, \dots, m\}$, 3) разрушительного воздействия $\{1, \dots, k, \dots, n\}$ потоков энергии и вещества, высвободившихся в результате происшествия. Иначе говоря, сумма безусловных вероятностей (P) появления всех событий на каждом из трех уровней этого дерева должна составлять единицу:

$$\sum_{i=1}^l P_{i1} = \sum_{j=1}^m P_{j2} = \sum_{k=1}^n P_{k3} = 1. \quad (5.2)$$

Во - вторых, все события данного дерева и входящие в него ветви, воспроизводящие условия причинения ущерба людским, материальным и природным ресурсам, должны быть разделены между собой по *правилам* деления понятий, принятым в формальной логике. Это означает, что возможные исходы должны делиться следующим образом:

а) всегда по одному основанию, т.е. с соблюдением лишь одного признака деления на i , j и k -м уровнях дерева;

б) непрерывно - переход к новому признаку может осуществляться лишь после рассмотрения всех возможных вариантов данного уровня;

в) соразмерно - суммарное число событий-исходов, выделенных на каждом уровне, должно быть точно равно их возможному количеству (в противном случае деление будет либо неполным, либо избыточным);

г) с соблюдением требования непересекаемости различных исходов на всех уровнях (исключается возможность повторного использования события на одном и том же уровне).

Как показывает опыт моделирования, использование вышеперечисленных правил построения и качественного анализа, исследуемых здесь деревьев может гарантировать адекватность реальности моделируемых ими опасных процессов, а также истинность вскрытых при этом закономерностей появления и предупреждения техногенных происшествий. В свою очередь, соблюдение таких условий позволяет обеспечить в последующем не только требуемую достоверность прогноза техногенного риска, но и приемлемую точность количественной оценки эффективности мер по его уменьшению.

5.3. Количественный анализ диаграмм типа дерево

Следующим этапом системного анализа и моделирования опасных процессов в техносфере с помощью диаграммы типа дерево служит априорная оценка их числовых параметров. Как правило, она связана с определением вероятности появления конкретных катастроф, аварий и несчастных случаев, реже - математического ожидания их количества на заданном интервале времени. В большинстве случаев на данном этапе также рассчитываются размеры ущерба и затрат, связанных с возникновением и предупреждением происшествий на производстве и транспорте.

Поскольку конечная цель рассматриваемого здесь моделирования направлена не на оценку, а на системный синтез требуемой безопасности, то результаты количественного анализа исследуемых нами процессов нужны в первую очередь для обоснования соответствующих мероприятий. Вот почему при их выборе должны использоваться данные качественного анализа полученных ранее моделей, прежде всего выявленные там минимальные сочетания исходных предпосылок дерева происшествия и оценки их значимости или критичности. Дело в том, что устранение причинных цепей, состоящих из наиболее значимых предпосылок, является самым эффективным способом обеспечения заданного уровня безопасности.

Однако в ряде случаев отдельный интерес может представлять и автономная предварительная оценка числовых характеристик, как головного события дерева происшествия, так и центрального события дерева его исходов. Например, если нужно отдать предпочтение или принять обоснованное решение:

а) о соответствии техногенного риска вновь созданного производственного или транспортного процесса тому его значению, которое предъявлено техническим заданием;

б) о выборе (по наименьшей вероятности происшествий) одного из

нескольких, подготовленных на конкурсной основе однотипных технических проектов.

Укажем рекомендации по проведению необходимой в таких случаях количественной оценки параметров каждой рассматриваемой здесь диаграммы, вначале для дерева происшествия, а затем и для дерева событий.

Подготовительным этапом к количественному анализу дерева происшествия служит дальнейшая формализация этой семантической диаграммы - аналитическое представление заданного ею процесса так называемой структурной функцией. В такой модели, помимо событий и связей между элементами, в качестве исходных данных также используются параметры, характеризующие вероятность или частоту исходных предпосылок на конкретном интервале времени.

Например, для изображенного выше (см. рис. 5.2) дерева данная функция, увязывающая с помощью алгебры событий моделируемое происшествие с его промежуточными и исходными предпосылками, имеет такой вид:

$$X = INK = (A + B)(C + D)(E + F + G) \quad (5.3)$$

При использовании вероятности $Q(L)$ в качестве объективной меры появления происшествия ее соответствующий многочлен оказывается следующим:

$$Q(L) = P(H)P(I)P(K) = P(A + B)P(C + D)P(E + F + G), \quad (5.4)$$

где $P(A)$, ..., $P(K)$ - вероятности появления событий-предпосылок этого дерева.

Упрощение структурных функций при необходимости осуществляют с соблюдением правил булевой алгебры. В частности, следуя закону поглощения, получают такие равенства:

$$A(AB) = AB; A + (A + B) = A. \quad (5.5)$$

При полученных подобным образом структурных функциях может быть рекомендована такая последовательность прогноза вероятности появления происшествия:

- 1) аналитическая модель данного процесса декомпозируется на отдельные блоки - сомножители и слагаемые функции;
- 2) в выбранных блоках выделяются те подмножества событий, которые соединены между собой условиями «и», «или» и имеют известные вероятности появления;
- 3) проводится расчет вероятностей наступления вершинных для таких блоков событий;
- 4) структурная функция упрощается заменой каждого подмножества одним членом, обладающим эквивалентной вероятностью;
- 5) подобным образом рассчитывается и вероятность появления головного события данного дерева.

При оценке числовых характеристик декомпозированной подобным образом модели следует руководствоваться следующими пятью основными правилами:

- 1) объединенные логическим условием «и» n предпосылок заменяют одним

событием с вероятностью появления PK (конъюнкция \wedge):

$$P_K = P_1 P_2 P_3 \dots P_n \prod_{i=1}^n P_i; \quad (5.6)$$

2) соединенные логическим условием «или» m предпосылок заменяют одним событием с вероятностью P_D (дизъюнкция \vee), равной

$$P_D = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_m) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i), \quad (5.7)$$

которая при $m = 2$ и $m = 3$ рассчитывается по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} P_{m=2} &= P_1 + P_2 - P_1 P_2; \\ P_{m=3} &= P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_2 P_3 + P_1 P_2 P_3; \end{aligned} \quad (5.8)$$

3) при известных структурных схемах безотказности технологического оборудования его параллельно соединенные элементы соответствуют логическому условию «и» этого дерева, а последовательно соединенные - «или»;

4) в случае объединения логическим условием «и» нескольких событий, одно из которых имеет близкую к единице вероятность, а другие - меньшую 0,01, допускается упрощение данной ветви путем отбрасывания события с большей вероятностью возникновения;

5) при объединении логическим условием «или» нескольких событий, одно из которых имеет близкую к нулю вероятность, а другие - на два - три порядка больше, также можно упрощать соответствующую ветвь, но отбрасывать уже нужно событие с малой вероятностью.

Кроме того, представляют интерес еще *два способа* количественной оценка вероятности головного события: а) с помощью выявленных ранее Минимальных сочетаний событий и б) при отсутствии точной информации о вероятностях исходных предпосылок соответствующей модели. Кратко охарактеризуем каждый из этих способов, начиная с первого.

Основная идея использования минимальных сочетаний сводится к построению другого, *эквивалентного* анализируемому дерева происшествия, включающего в себя сочетания какого-либо одного типа, которые соединяются в новом дереве всего одним логическим условием: «или» для дерева, состоящего из МПС, и условием «и» - для МОС.

Например, если в дереве происшествия число МПС равно a , в каждом i -М из которых содержится m_i исходных событий, то можно построить его эквивалент (рис. 5.3, а), включающий в себя a исходных (промежуточных для прежнего дерева) предпосылок, объединенных логическим условием «или». При этом в каждом из новых событий исходные предпосылки прежнего дерева соединены условием «и». Если же дерево-оригинал содержит в себе b штук МОС с n_k исходными событиями в каждом из них, то его эквивалент (рис. 5.3, б) объединяет уже исходные предпосылки логическим условием «и», а каждое событие новой модели образуется логическим сложением исходных событий исходного дерева.

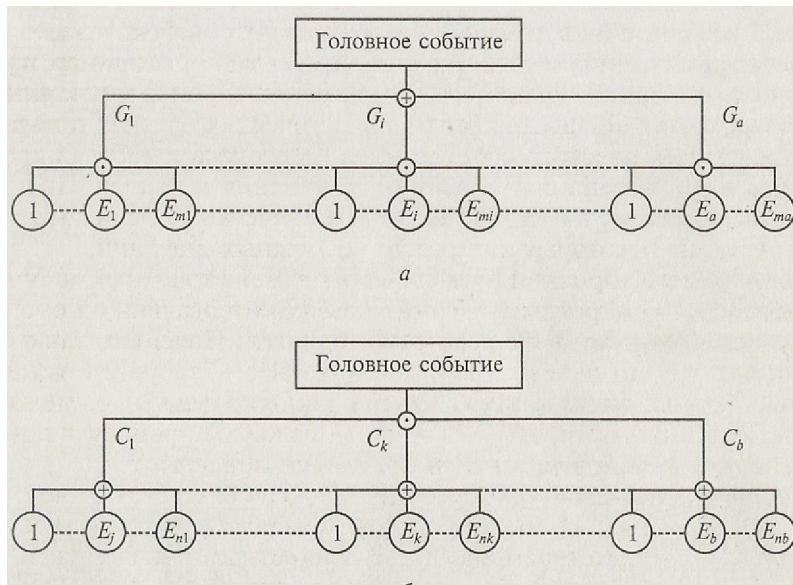


Рис. 5.3. Модификация дерева происшествия: а - первое, i -е и a -е МПС; б - первое, k -е и b МОС

Из изложенного выше следует, что для расчета вероятности Q возникновения происшествий могут быть использованы следующие выражения:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^a (1 - \prod_{j=1}^{m_i} P_{ij}); \quad (5.9)$$

$$Q = 1 - \prod_{k=1}^b [1 - \prod_{i=1}^{n_k} (1 - P_{ik})], \quad (5.10)$$

где a, b - количество соответственно минимальных пропускных и минимальных отсечных сочетаний дерева происшествия; m_i, n_k число исходных предпосылок в каждом его i -м пропускном и k -м отсечном минимальных сочетаниях исходных событий - предпосылок.

Второй способ основан на использовании не точной, а *приближенной* исходной информации о вероятностях ошибок, отказов и нерасчетных внешних воздействий. Это имеет место, например, при прогнозировании безопасности создаваемых производственных объектов, когда нет достоверных статистических данных о параметрах технологического оборудования, персонала и рабочей среды. Его идея связана с изменением отношения к интерпретации этой информации, т. е. представления ее нечеткими величинами, заданными на некоторых интервалах возможных значений.

Наиболее же короткий путь состоит в замене точечных оценок вероятностей конкретных предпосылок их интервальными оценками, выраженными в форме нечетких чисел. Поясним, как это делается в теории нечетких множеств, точнее - теории возможностей. Однако вначале приведем ряд дополнительных сведений об упомянутых категориях, а затем уже изложим процедуру приближенной оценки вероятности появления происшествия.

Под *нечеткой величиной* Ξ обычно подразумевается подмножество, определяемое на множестве действительных чисел и характеризующееся соответствием между ее конкретными значениями и степенями принадлежности μ

на числовом интервале $[0,1]$. Функция *принадлежности* значений такой величины $\pi(\Xi)$ рассматривается как распределение возможностей появления определенных действительных чисел. *Модальным* же значением нечеткой величины $m =$ является элемент подмножества, обладающий единичной степенью принадлежности - наибольшей возможностью наблюдения в рассматриваемых условиях:

$$\mu_{\Xi}(m) = 1 \quad (5.11)$$

В свою очередь, *нечетким числом* Σ считается полунепрерывный сверху, компактный нечеткий интервал с выпуклой функцией принадлежности и единственным модальным значением. Иначе говоря, это понятие часто выражается на практике словами «приблизительно, примерно, около, порядка m ». Естественно, что функция принадлежности нечеткого числа $\pi(\Sigma)$ может иметь несколько форм, отличающихся размахом, т. е. шириной диапазона возможных значений принимаемых им действительных чисел.

Что касается сходства между возможностной и вероятностной интерпретациями различных переменных, то оно проявляется в следующем. При неограниченном уменьшении размаха нечеткое число вырождается в четкую фиксированную величину. А вот размах нечеткого числа аналогичен области тех значений случайной величины, на которых совокупная вероятность ее появления равна единице. Однако максимальное значение функции принадлежности $\pi(\Sigma) = 1$ относится уже не ко всему нечеткому интервалу, а только к модальному значению действительного числа.

Поясним также, что, согласно сформулированному Л. Заде принципу обобщения, на нечеткие числа распространяются известные правила логического сложения и перемножения. Такие преобразования могут быть проведены для всех нечетких чисел с непрерывными функциями принадлежности; однако наиболее просто это достигается при их аппроксимации $L - R$ типа [16].

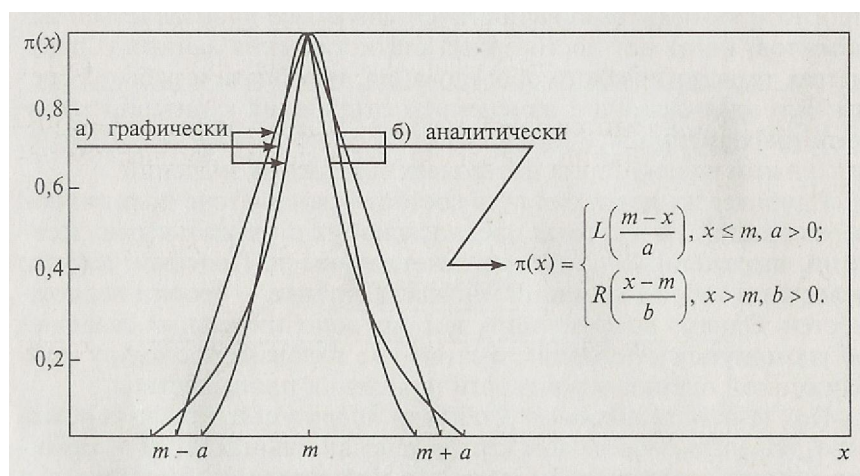


Рис. 5.4. Способы задания нечетких чисел:

m - модальное значение числа; a, b - левый и правый коэффициенты размаха; $L(*)$, $R(*)$ - нечеткие формы левой и правой частей, пересекающиеся над точкой m

Различные функции принадлежности одного и того же нечеткого числа $\Sigma = x$ с их общим аналитическим выражением этого типа представлены в качестве

примера на рис. 5.4, а основные правила алгебраических преобразований аппроксимированных таким способом нечетких чисел - в прил. П.3.

Используя обозначения представленных L - R формой нечетких чисел в виде $\Sigma = (m, \alpha, \beta)_{LR} = (m, \alpha, \beta)$ и руководствуясь формулами табл. П.3.4, можно получить выражения для умножения и сложения нечетко заданных параметров дерева происшествия. Например, для событий, объединенных условием логического перемножения, справедливо следующее выражение:

(5.12)

где \circ - операция логического перемножения нечетких чисел L -, R формы; m_{ri} , α_{ri} , β_{ri} - рекурсивные члены, рассчитываемые по таким формулам:

(5.13)

Подобно проводится приближенная оценка меры возможности появления события, образованного в дереве логическим условием «или»:

(5.14)

где m_{ri} , α_{ri} , β_{ri} - аналогичные члены, рассчитываемые по схожим формулам:

(5.15)

Считается, что наиболее подходящей областью применения: только что рассмотренного способа нечеткого интервального Прогнозирования техногенного риска является оценка возможности появления и предупреждения уникальных (редких и наиболее тяжелых по последствиям) катастроф и аварий. В этом случае оправдана необходимость привлечения высококвалифицированных экспертов и повышенная трудоемкость моделирования, что связано, в том числе с проведением итерационных процедур вычисления.

В завершение данного параграфа дадим краткие рекомендации, касающиеся особенностей количественного анализа дерева событий - исходов техногенного происшествия. Прежде всего, напомним, что его целью служит не только предварительная количественная оценка ожидаемого среднего социально-экономического ущерба, но и обоснование наиболее эффективных мероприятий по его снижению в случае необходимости.

Решение каждой из этих главных задач может быть осуществлено лишь с использованием не менее чем трех уровней соответствующей семантической модели - путем последовательного определения:

а) количества нежелательно высвободившихся энергии или вещества - K , а также режима их истечения во времени и расположения источников выброса;

б) размеров пространства, в пределах которого сформировались поля поражающих факторов таких выбросов или продуктов их последующей трансформации - Π ;

в) величины ущерба от их разрушительного воздействия на оказавшиеся в зонах поражения этих факторов людские, материальные и природные ресурсы $У$.

Порядок расчета перечисленных выше показателей совместно с условиями контроля правильности исходных данных и промежуточных результатов проиллюстрированы на рис. 5.5. Расположенные непосредственно под изображенным там деревом формулы необходимы для последовательного прогноза математического ожидания соответствующих случайных величин - $M[K]$, $M[\Pi]$ и $M[Y]$.

В нижней строке рисунка приведены критерии проверки правильности исходных данных об условных вероятностях, используемых при количественном анализе данной семантической модели. В частности, сумма всех условных вероятностей каждого уровня дерева должна быть равной точно Q , а не единице, как это имело место при проверке полноты его возможных исходов, где они рассматривались как независимые события, составляющие полную группу (см. формулу (5.2)).

Показанное в центральной части рис. 5.5 дерево учитывает не все, а лишь наиболее характерные последовательности образующих его промежуточных и конечных событий. Это символизируется оборванными ветвями, заканчивающимися стрелками и штриховым обозначением ветви, соединяющей события 1_i и 3_{k+2} .

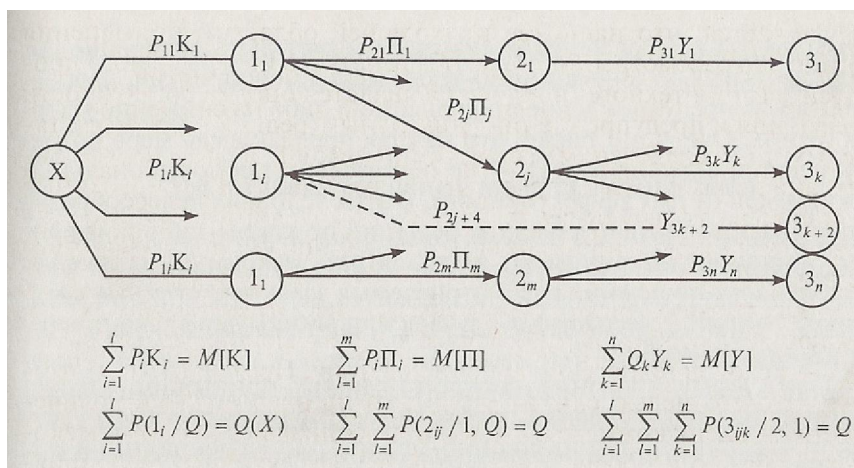


Рис. 5.5. Порядок и условия расчета ожидаемого ущерба:

1 - истечение энергозапаса в количестве (K); 2 - распространение и трансформация в пределах площади (Π); 3 - разрушительное поглощение с причинением ущерба (Y) ресурсам

Она учитывает возможность объединения двух уровней модели, например распространения и губительного поглощения электрической энергии телом человека, включенного в соответствующую цепь.

Естественно, что количественный прогноз техногенного ущерба с помощью дерева событий требует информации обо всех параметрах модели, изображенной на рис. 5.5. Напомним, что состав учитываемых ею основных факторов (свойств человека машинных систем) приведен в конце разд. 5.2. Укажем также, что

процедура приближенной оценки средних количеств $M[K]$, площадей $M[\Pi]$ и ущербов $M[Y]$ будет проиллюстрирована в разд. 5.4, а более строгие и детальные рекомендации, касающиеся порядка прогнозирования этих параметров, - в гл. 9 и 10.

В заключение, укажем порядок обоснования мер по снижению техногенного риска с помощью диаграмм причинно-следственных связей типа дерево. Необходимость в этом всегда возникает в тех случаях, когда априорная оценка данной величины не удовлетворяет требованиям безопасности проведения исследуемых техносферных процессов.

Например, если ожидаемые вероятности возникновения происшествий или ущерб от них превышают максимально допустимые значения.

Выходом из создавшихся ситуаций может быть внедрение дополнительных организационно-технических мероприятий, направленных на предупреждение происшествий либо на снижение ущерба от них. Очевидно также, что каждая предлагаемая мера потребует для внедрения затрат – не обязательно пропорциональных ожидаемой от них эффективности. В этих условиях целесообразна оптимизация соответствующих решений по каким-либо критериям, например по минимуму таких затрат, максимуму снижения вероятности появления рассматриваемых здесь техногенных катастроф, аварий и несчастных случаев или минимуму риска причинения ими ущерба.

При формулировании соответствующих принципов следует исходить из практической необходимости одновременного учета многочисленных организационно-технических мероприятий и еще большего числа их сочетаний. Например, даже для двух подобных мер возможны уже четыре альтернативы: внедрить первую, вторую, обе вместе или отказаться от них. Это предполагает достаточно трудоемкий перебор, трудно реализуемый без использования современных математических и машинных методов.

А вот исходные данные, необходимые для обоснования оптимальных мероприятий, могут быть получены с помощью рассматриваемых здесь моделей типа дерево. Действительно, для определения эффекта, ожидаемого от внедрения дополнительного технического средства r или организационного мероприятия h , достаточно провести повторный количественный анализ, но уже при новых (уменьшенных) значениях вероятностей P_r и P_h конкретных предпосылок дерева происшествия или условных вероятностей $P(i, j, k)$ и размеров ущерба Y_k от отдельных исходов дерева событий. Общая же схема соответствующих расчетов будет такой: $\Delta P_r \Delta P_h \rightarrow Q_{th}(X) \rightarrow \Delta M_{rh}[Y]$ или $\Delta P(i, j, k) \rightarrow \Delta Y_k \rightarrow \Delta M_k[Y]$, где символом Δ показано изменение рассматриваемых параметров.

Очевидно, что самыми предпочтительными будут те мероприятия, которые соответствуют: а) наибольшему (при выделенных затратах S_B) снижению либо вероятности головного события дерева происшествия $\Delta Q_{th}(X)$, либо среднего ущерба $\Delta M_k[Y]$ от вызванных им наиболее разрушительных сценариев высвобождения, распространения и поглощения энергозапаса; б) наименьшим затратам S_h и S_{ijk} на внедрение мероприятий с целью получения требуемого от них эффекта (снижения риска до приемлемого уровня).

Именно в обосновании наилучших организационно-технических решений и

состоит системный анализ опасных процессов в техносфере и системный синтез мер по снижению техногенного риска. Тем более что моделирование происшествий с помощью диаграмм типа дерево указывает и способ определения предпочтительных для этого стратегий, основанный на учете значимости и критичности соответствующих событий-предпосылок. Данный факт еще раз подтверждает актуальность и плодотворность рассмотренных здесь моделей и методов системного исследования техносферы.

5.4. Иллюстративные модели типа дерево

Проиллюстрируем работоспособность изложенных выше методов на конкретных примерах системного анализа и моделирования аварийности и травматизма на производстве и транспорте. При этом вначале рассмотрим: 1) техногенное происшествие, связанное с внезапным выбросом горючего при заправке какого-либо воздушного судна по приведенной на рис. 5.6 блок-схеме данного процесса; 2) несчастный случай на железнодорожной станции, вызванный травмированием подвижным составом людей, занимающихся очисткой ее путей.

Для интерпретации условий появления каждого такого события ниже используется одно и то же дерево происшествия, а для прогнозирования возможного ущерба - одно дерево событий (его исходов). Обе эти модели проиллюстрированы на рис. 5.7 с помощью дерева происшествия (левая часть диаграммы) и дерева событий - его исходов (правая).

При этом в первом случае считалось, что авария возникла в результате пролива криогенного горючего (сжиженного водорода), являющегося аварийно химическим опасным веществом (АОХВ), из-за несвоевременного отключения насосов и переполнения баков заправляемого летательного аппарата. Наименования и коды учитываемых здесь исходных и промежуточных событий, способных в определенных условиях привести к исследуемой техногенной аварии, даны в табл. 5.1 совместно с вероятностями появления исходных предпосылок – P_i ($i = 1...13$). Вопросительные знаки в ней указывают на необходимость количественного анализа левой части приведенной модели.

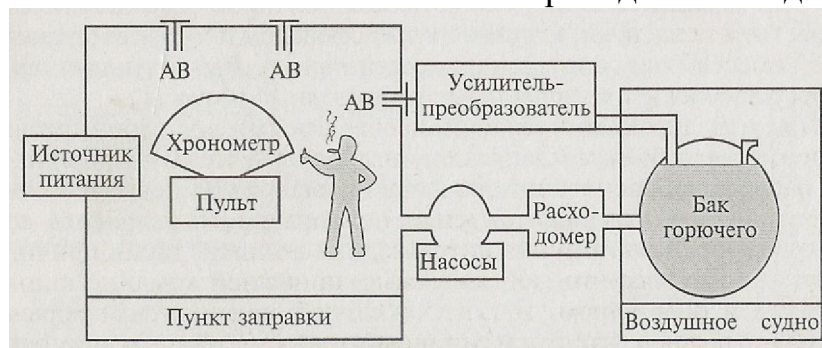


Рис. 5.6. Блок-схема процесса заправки

Рис. 5.7. Дерево происшествия и дерево событий исходов

Дерево происшествия (левая часть диаграммы) строилось здесь дедуктивно от аварии с выбросом АХОВ - головного события (*X*) к вероятным причинам-предпосылкам 1, 2, 3-го и исходного (левого на рис. 5.7) уровней. Дерево исходов аварии синтезировалось индуктивно: от центрального события (*X*) к возможным сценариям, отличающимся между собой по количеству высвободившихся вещества или энергии, формам их трансформации и распространения, способам разрушительного воздействия соответствующих потоков на людские, материальные и природные ресурсы.

При моделировании условий, необходимых и достаточных для разгерметизации баков заправляемого судна, учтены две причины первого уровня - неотключение насосов из-за невыдачи соответствующей команды (И) или неисправности устройств ее исполнения (Л), каждая из которых тоже вызвана двумя причинами - соответственно (В, Е) (невыдача нужной команды автоматикой и оператором) и 12,13 (отказ выключателя или обрыв цепи управления насосной установки), рассматриваемыми для отказа (Л) как исходные события.

Таблица 5.1

Предпосылки аварийного пролива горючего при заправке

КОД	Наименование исходных и промежуточных событий	<i>p</i> ;
1	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объемной дозы заправленного горючего	0,0005
2	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее воздействие)	0,00001
3	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)	0,0001
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера (измерителя потока горючего)	0,0003
6	Отказ датчика уровня в баке горючего	0,0002
7	Оператор не заметил световой индикации 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 насоса по истечении заданного времени	0,001
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени заправки	0,004
11	Отказ датчика времени заправки (хронометра)	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насосов	0,00001
13	Обрыв цепей управления насосами подачи горючего	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 не пытался отключить насосную установку в заданное время	?
И	Команда на отключение насосной установки не поступала	?
Л	Команда на отключение насосов не выполнена	?

Каждая из причин второго уровня (В, Е) обусловлена, в свою очередь двумя предпосылками третьего уровня (А, Б) - отказ средств выдачи или передачи команды и (Г, Д) - оператор не заметил сигнала на отключение или не смог отключить насосы, а также тремя (3, 4 и 9) предпосылками нижнего уровня: соответственно система автоматической выдачи дозы оказалась отключенной; усилитель - преобразователь сигналов от ее датчиков был неисправным; оператор не знал о необходимости или возможности отключения насосов вручную, руководствуясь показаниям хронометра.

Наконец, каждая из четырех предпосылок третьего уровня вызывалась тоже двумя исходными событиями (1, 2; 5, 6; 7, 8 и 10, 11). В качестве этих и других исходных предпосылок рассматривались: обрыв цепей, ослабление сигнала; неисправности датчиков уровня и расхода горючего; отказ усилителей - преобразователей их сигналов; ошибки восприятия и дешифровки оператором поступающей с них и хронометр информации; нерасчетные внешние воздействия на систему автоматического отключения насосов.

При моделировании этой же диаграммой второго происшествия - несчастного случая на железнодорожном транспорте рассматривались довольно типичные случаи травмирования работников путевого хозяйства поездами, проходящими через станцию, вблизи места работ. Коды и наименования событий, учитываемых левой частью диаграммы рис. 5.7, а также вероятности включенных в нее исходных предпосылок приведены в табл. 5.2.

При этом также предполагалось, что очистка стрелочных переходов от снега проводится по отдельным колеям, на которых временно приостанавливается движение, тогда как на соседних путях движение поездов продолжается. Обязанности по обеспечению безопасности этих работ возлагались на самих работающих, а также на дежурного по станции, автоматические средства безопасности движения и локомотивные бригады.

Несмотря на эти меры безопасности, полностью не исключалась возможность воздействия подвижного состава на работающих вследствие появления соответствующих случайных предпосылок. В частности, в модели учтена вероятность травмирования людей поездами, проходящими по очищаемому или смежному с ним пути - события И, Л. Это могло произойти из-за случайного въезда на место работ скорого поезда (предпосылки В и Е второго уровня) или выхода рабочих на смежный путь и их столкновения с движущимся там подвижным составом – исходные события 12 и 13.

В свою очередь, предпосылки В, Е стали возможными в результате образования причинных цепей А, Б и Г, Д, вызванных ошибками и отказами,

содержание которых приведено в табл. 5.2. Далее здесь не раскрываются условия образования предпосылок третьего и последующих уровней. Оставим это для читателя (в качестве задания-упражнения).

Таблица 5.2

Предпосылки травмирования людей подвижным составом

Код	Наименование исходных и промежуточных событий	P;
1	Отказ проводных датчиков контроля занятости пути	0,0001
2	Отказ беспроводных датчиков запрещающих сигналов	0,0001
3	Система автоматической локомотивной сигнализации (САЛС) отсутствует или отключена (ошибка контроля)	0,0005
4	Отказ усилителя - преобразователя устройства выдачи запрещающих сигналов, смонтированного в локомотиве	0,0005
5	Обрыв цепей основного сигнала на остановку локомотива	0,0001
6	Ослабление резервного сигнала на остановку поезда в результате внешних помех (нерасчетное воздействие извне)	0,0005
7	Запоздалое информирование машиниста скорого поезда диспетчером о проведении очистки путей рабочими (ошибка)	0,005
8	Несвоевременная фиксация машинистом поезда сигналов запрета движения по станции (ошибка)	0,008
9	Локомотивная бригада поздно заметила рабочих и не стала резко тормозить с целью исключения схода поезда	0,01
10	Локомотивная бригада не заметила никаких препятствий для движения по станции	0,005
11	Локомотивная бригада не заметила людей, неожиданно оказавшихся непосредственно перед поездом	0,001
12	Выход рабочих на путь, открытый для движения поезда	0,005
13	Опасное приближение рабочих к подвижному составу, проходящему по смежным путям	0,003
А	Отказ датчиков занятости пути и индикаторов запрещающего сигнала, смонтированных в скором поезде	?
Б	Отказ устройств управления экстренной остановкой скорого поезда	?
В	Скорый поезд с неработающей САЛС подъехал к месту работ по пневмоочистке стрелочных	?

	переводов	
Г	Бригада скорого поезда пыталась, но не смогла его экстренно остановить	?
Д	Бригада скорого поезда не видела необходимости в экстренной остановке поезда	?
Е	Локомотивная бригада вовремя не остановила поезд	?
И	Травмирование путевых рабочих скорым поездом	?
Л	Травмирование путевых рабочих другим подвижным составом, проходящим по смежным путям	?

Очередной этап исследования опасных процессов осуществлен путем построения древа событий - возможных исходов рассматриваемых здесь происшествий (правая часть рис. 5.7). Как для аварии, так и для несчастного случая исследовалось 13 конечных сценариев, которые формировались на трех уровнях в зависимости от условий: а) истечения; б) распространения и трансформации; в) разрушительного воздействия высвободившихся потоков энергии и вредных веществ. (Заметим, что равенство числа исходов и предпосылок в таких моделях не обязательно.)

В частности, для аварии в первую очередь учитывались объемы внезапно пролитого горючего: Б, С, М - большой, средний и малый, вызванные соответственно потерей устойчивости корпуса летательного аппарата образованием трещины в обечайке его топливного отсека и срабатыванием дренажно-предохранительного клапана. Далее считать, что большой по объему пролив мог завершиться пожаром или взрывом (В) образовавшегося при этом облака либо пролитое криогенное горючее просто испарилось (И).

Подобным образом прогнозировались и разрушительные последствия, обусловленные воздействием соответствующих факторов на людские, материальные и природные ресурсы. В правой части модели они учтены событиями, связанными с утечкой топлива и высвобождением накопленной в нем энергии: а) большая - 1...3 (взрыв: 4, 5 (пожар) и 6-8 (испарение); б) средняя - 9,10 и в) малаг 11...13. цифры в скобках на предшествующих ветвях древа ходов указывают: первые - на вероятности их появления, вторые - на объемы пролитого горючего (1-й уровень) и размеры зон поражения, возможных при его взрыве, пожаре или испарении (2-й уровень древа).

Примерно в такой же последовательности могут быть спрогнозированы и размеры ущерба от несчастного случая, вызванного воздействием на людей кинетической энергии подвижного железнодорожного состава. Действительно, в зависимости от ее величины - Б, С, М и других случайных причин в контакте с локомотивом или вагонами могут оказаться, например, вся бригада, два или один путевой работник. При групповом несчастном случае некоторые из них могут оказаться под колесами, другие - отброшенными под воздействием удара, а третьи - проташенными в течение некоторого времени - В, П, И.

Естественно, что каждый конечный исход 1...8 будет характеризоваться своим ущербом, зависящим от того, какая часть тела человека оказалась под

колесами и была травмирована ударным или захватным воздействием подвижного состава. Предоставим читателю спрогнозировать подобные последствия самостоятельно.

5.5. Апробация методов качественного и количественного анализа диаграмм типа дерево

В ходе качественного анализа левой части модели рис. 5.7 удалось выявить 27 минимальных пропусковых сочетаний: два из них включают по одному исходному событию (синглеты) - 12 и 13; двадцать состоят из двух предпосылок (дуплеты) - 3,7; ...; 4,11; пять имеют по три исходных события (триплеты) - 5, 6, 7; ...; 5, 6, 11. Более того, в рассматриваемом здесь дереве обнаружены также и три минимальных отсечных сочетания предпосылок: 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13; 1, 2, 3, 4, 6, 12, 13 и 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13.

Анализ этих данных на качественном уровне свидетельствует, что из учитываемых нами событий нижнего уровня наиболее значимы для появления исследуемых происшествий 12 и 13; наиболее критичны для их предупреждения 5 и 6; тогда как все остальные исходные предпосылки в этом смысле (без учета их вероятностей) являются качественно равнозначными. Более точные выводы дает количественный анализ, проведенный с помощью следующей структурной функции дерева происшествия:

$$\begin{aligned} X &= \text{ИВЛ} = (B \wedge E) \vee \text{Л} = [(A \vee \text{ИВ} \vee 4 \vee B) \wedge (\Gamma \vee \text{Д})] \vee \text{Л} = \\ &= [3 \vee (\text{ИВ} \vee 2) \vee 4 \vee (5 \wedge 6)] \wedge [(7 \vee 8) \vee (9 \vee \text{Д})] \vee \text{Л} = \\ &= [3 \vee (1 \vee 2) \vee 4 \vee (5 \wedge 6)] \wedge [(7 \vee 8) \vee 9 \vee (10 \vee 11)] \vee (12 \vee 13). \end{aligned} \quad (5.16)$$

Напомним, что символы « \vee », « \wedge » выше означают булевы операторы дизъюнкции и конъюнкции, соответствующие условиям «или», «и».

Прогноз вероятности возникновения головного события исследуемого дерева происшествия $Q(X)$ будет осуществлен здесь двумя путями: а) приближенно - заменой в выражении (5.16) кодов событий оценками вероятности их появления, а операторов « \vee » и « \wedge » - арифметическими действиями «+» и « \times », с последующим проведением дополнительных упрощений и вычислений; б) с помощью выявленных выше минимальных сочетаний исходных предпосылок - по формулам (5.9) и (5.10), при условии, что входящие в них параметры принимают следующие значения: $a = 27$; $m_i = 2$ для $i = 1 \dots 20$; $m_i = 3$ для $i = 21, \dots, 25$ и $m_i = 1$ для $i = 26, 27$; $b = 3$, $n_k = 7$ - для всех значений k .

Так, после подстановки значений параметров P_i в формулу (5.9), имеем

$$\begin{aligned} Q(X) &= 1 - [(1 - P_3 P_7)(1 - P_3 P_8)(1 - P_3 P_{10})(1 - P_3 P_{11})(1 - P_2 P_7) \times \\ &\times (1 - P_2 P_8)(1 - P_2 P_9)(1 - P_2 P_{10})(1 - P_2 P_{11})(1 - P_1 P_7)(1 - P_1 P_8) \times \\ &\times (1 - P_1 P_9)(1 - P_1 P_{10})(1 - P_1 P_{11})(1 - P_4 P_7)(1 - P_4 P_8)(1 - P_4 P_9) \times \\ &\times (1 - P_4 P_{10})(1 - P_4 P_{11})(1 - P_5 P_6 P_7)(1 - P_5 P_6 P_8)(1 - P_5 P_6 P_9) \times \\ &(1 - P_5 P_6 P_{10})(1 - P_5 P_6 P_{11})(1 - P_{12})(1 - P_{13})] = \\ &= 0,0013 \dots 0,0967. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Аналогичный результат получается здесь и с помощью формулы (5.10)

$$\begin{aligned}
Q(X) &= [1 - (1 - P_3)(1 - P_2)(1 - P_1)(1 - P_4)(1 - P_5)(1 - P_{12})(1 - P_{13})] \times \\
&\times [1 - (1 - P_3)(1 - P_2)(1 - P_1)(1 - P_4)(1 - P_6)(1 - P_{12})(1 - P_{13})] \times \\
&\times [1 - (1 - P_7)(1 - P_8)(1 - P_9)(1 - P_{10})(1 - P_{11})(1 - P_{12})(1 - P_{13})] = \\
&= 0,0013 \dots 0,0967, \quad (5.18)
\end{aligned}$$

где $Q(X)$ и $P_i (i = 113)$ - соответственно вероятности рассматриваемых происшествий и исходных предпосылок к ним, содержание каждой из которых приведено в табл. 5.1 и 5.2.

Поясним, что нижние значения вероятности появления исследуемых здесь происшествий, найденной по формулам (5.17) - (5.18), относятся к аварии, а верхние - к несчастному случаю. А вот приближенная оценка этих вероятностей, проведенная с помощью структурной функции (5.16), после пренебрежения ее слагаемыми и сомножителями более высокого порядка малости приводит уже к такому результату:

$$\begin{aligned}
Q(X) &\cong (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)(P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11}) + P_{12} + P_{13} = \\
&= 0,001 \dots 0,083. \quad (5.19)
\end{aligned}$$

Заметим также, что последнее упрощение допустимо проводить лишь при сравнительно малом числе исходных предпосылок ($n < 10-15$) и относительно малой вероятности появления каждой из них ($P_i < 0,01$). В противном случае приближенный расчет $Q(X)$ может сопровождаться слишком завышенными результатами, а иногда, и привести к получению вероятностей, величина которых превышает единицу. А вот при соблюдении только что перечисленных условий считается, что погрешность вычислений не превышает, как правило, 15% от значения, полученного после более корректного преобразования выражений типа (5.16) в расчетные многочлены.

Результат сделанных выше расчетов $Q(X)$ нужно истолковывать следующим образом: при принятых исходных данных одна авария при проведении заправочных работ на летательных аппаратах приходится в среднем на тысячу заправок, а один несчастный случай примерно на одной из ста железнодорожных станциях. Сравнение же частоты указанных происшествий свидетельствует о том, что исследуемые здесь несчастные случаи с людьми на железнодорожном транспорте должны встречаться примерно в восемьдесят раз чаще, чем аварии при заправке ракет или самолетов.

Учитывая трудоемкость даже упрощенного количественного анализа дерева происшествий, рассмотрим возможность автоматизации этой процедуры путем формализации исходных данных, необходимых для вычисления по формулам (5.9) и (5.10). С этой целью используем матричный способ кодирования минимальных пропускных и отсечных сочетаний исходных событий. Поясним его сущность на конкретном примере - с помощью, приведенной на рис. 5.8 таблицы, символом «○» в которой показана принадлежность события к конкретному сочетанию, а содержание переменных i, j, k, l, a и b раскрыто в комментарии к данным формулам.

Анализ изображенной там таблицы позволяет пояснить идею кодирования и

машинной обработки параметров формул (5.9), (5.10), (5.16), указывающей условия пропуска сигнала от исходных предпосылок до головного события дерева, в том числе и представленного в левой части рис. 5.7. Каждая строка этой таблицы (*i*-е или *j* -е подмножество) представляется вектором двоичных чисел, а их минимальные пропускное или отсечное сочетания - соответствующими матрицами. Как итог каждое такое подмножество может быть выражено одним десятичным числом, а их набор, т. е. сочетание этих подмножеств, - одномерным массивом десятичных чисел.

Рис. 5.8. Матричный способ представления минимальных сочетаний

		Номер предпосылки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
№ событий, образующих минимальные сочетания	Пропускное	<i>i</i> = 1	<i>m_i</i> = 2	⊕						⊕								
			<i>m_i</i> = 2	⊕							⊕							
		<i>i</i> = 2	<i>m_i</i> = 2		⊕							⊕						
			<i>m_i</i> = 2		⊕											⊕		
		<i>i</i> = 20	<i>m_i</i> = 2		⊕											⊕		
		<i>i</i> = 21	<i>m_i</i> = 3					⊕	⊕	⊕								
		<i>i</i> = 25	<i>m_i</i> = 3					⊕	⊕							⊕		
	<i>i</i> = 26	<i>m_i</i> = 1														⊕		
	<i>i</i> = 27	<i>m_i</i> = 1															⊕	
	Отсечное	<i>l</i> = 1	<i>n_k</i> = 7	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕							⊕	⊕	
<i>l</i> = 2		<i>n_k</i> = 7	⊕	⊕	⊕	⊕			⊕						⊕	⊕		
<i>l</i> = 3		<i>n_b</i> = 7								⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕		

Рис. 5.8. Матричный способ представления минимальных сочетаний

Например, первое МПС (см. верхнюю строку рис. 5.8) образуется двумя исходными событиями 1 и 7, что эквивалентно вектору из 13 двоичных цифр: 1000001000000 или одному десятичному числу, равному $2^{12} + 2^6 = 4096 + 64 = 4160$. Все остальные пропускные сочетания также могут быть представлены одномерными массивами двоичных чисел, а весь их набор - соответствующим кортежем. Для МПС он состоит из 27 (в нашем 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 - из трех: <7939, 7811 и 255>.

Алгоритм расчета вероятности возникновения техногенных происшествий, использующий описанный способ цифрового кодирования информации о минимальных сочетаниях событий, позволил разработать соответствующую компьютерную программу.

Проверка ее работоспособности осуществлена, как это видно из табл. 5.3, путем решения задачи 3 оценки эффективности взятых для примера 13 альтернативных мероприятий. Они направлены на совершенствование безопасности исследуемой заправки за счет принятия мер, понижающих вероятности исходных предпосылок P_i ($i = 1 - 13$).

Фрагмент отчета с исходными данными и результатами расчета

Задача 3														
Оценка эффективности мероприятий по предупреждению аварийности и травматизма (априорно с помощью модели типа дерево происшествий)														
Исходные данные														
Тип происшествий — авария при заправке														
Ожидаемый средний ущерб — 100 000														
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														
№	Вероятность исходных предпосылок													
0	0,030	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,020	0,010	0,030	0,020	0,001	0,001	0,001	
1	0,002	0,006	0,004	0,002	0,010	0,003	0,001	0,008	0,004	0,007	0,005	0,005	0,014	
2	0,021	0,003	0,002	0,001	0,003	0,001	0,001	0,004	0,007	0,005	0,005	0,004	0,004	
3	0,021	0,004	0,002	0,002	0,003	0,001	0,001	0,014	0,007	0,005	0,005	0,004	0,014	
4	0,010	0,006	0,004	0,001	0,008	0,003	0,001	0,016	0,002	0,007	0,005	0,004	0,014	
5	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001	0,003	0,001	0,010	0,020	0,006	0,005	0,001	0,012	
6	0,003	0,006	0,004	0,002	0,008	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,005	0,004	
7	0,003	0,005	0,004	0,002	0,004	0,003	0,002	0,002	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001	
8	0,004	0,005	0,004	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,005	0,005	0,003	0,004	
9	0,014	0,003	0,005	0,001	0,002	0,002	0,003	0,001	0,010	0,003	0,006	0,005	0,005	
10	0,005	0,010	0,005	0,005	0,003	0,002	0,010	0,003	0,002	0,018	0,004	0,002	0,005	
11	0,012	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,001	0,004	0,007	0,004	0,002	0,005	
12	0,010	0,004	0,002	0,002	0,001	0,004	0,003	0,003	0,008	0,003	0,004	0,005	0,001	
13	0,012	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001	0,003	0,004	0,016	0,002	0,001	0,005	0,003	
Результаты решения														
Альтернатива	Вероятность	Ожидаемые затраты	Ожидаемый эффект	Удельный вклад										
0	0,0010000													
1	0,0000004	123	0,00099996	0,812										
2	0,0000001	2340	0,00099999	0,043										
3	0,0000001	1430	0,00099999	0,069										
...										
13	0,00000600	2560	0,00099940	0,038										

Значения вероятностей приведены в верхних строках этой таблицы. Совместно с другими исходными данными - кодами МОС и МПС, величиной среднего ущерба от конкретного техногенного происшествия Y и затратами S_k на внедрение каждой из 13 альтернатив. А вот в нижней части показаны уже результаты компьютерного расчета: а) ожидаемое от внедрения каждой альтернативы новое значение вероятности Q_k (вторая колонка); б) требуемые для этого затраты S_k (третья колонка); в) соответствующее конкретной альтернативе снижение исходной вероятности и г) сопутствующий соответствующему снижению ущерба удельный эффект (четвертая и пятая колонки).

Последний параметр рассчитывается делением затрат S_k на снижение ущерба ΔY_k , ожидаемое от внедрения каждой конкретной альтернативы. В свою очередь, значение ΔY_k определяется путем перемножения разности ΔQ_k ,

найденной вычитанием из первой строки соответствующей колонки данной таблицы последующих значений этой вероятности, на средний ущерб от данного происшествия.

Как видно из приведенного отчета, при прогнозе техногенного риска использованы оба типа минимальных сочетаний: МОС, десятичный код которых представлен там тремя первыми цифрами, и МПС - последние 27 десятичных чисел. Из рассмотренных альтернатив могут быть выбраны те, которые требуют минимальных затрат и обеспечивают понижение вероятности происшествия до требуемого значения. Детальное изложение такого синтеза дано в конце учебного пособия (см. разд. 15.3) на конкретных примерах.

В целом же можно утверждать, что исследование аварийности и травматизма с помощью диаграмм типа дерево позволяет решать ряд практически важных задач прогнозирования техносферной безопасности и априорной оценки эффективности мер, предлагаемых для ее поддержания на требуемом уровне, в том числе и при низкой достоверности реально имеющихся данных о некоторых из только что перечисленных исходных параметрах, характеризующих условия появления происшествия.

Проиллюстрируем возможность использования нечеткого подхода к количественному анализу техногенных происшествий на примере еще одного дерева, показанного на рис. 5.9 и интерпретирующего условия появления несчастного случая при выполнении конкретной технологической операции. Наименования исходных предпосылок рассматриваемого происшествия и нечеткие меры возможности P ; их появления представлены в табл. 5.4.

Рис. 5.9. Дерево происшествия для несчастного случая

Таблица 5.4

Характеристики и параметры дерева происшествий

Код	Постулируемая предпосылка	m_i	$\alpha_i = \beta_i$
<i>A</i>	Оператор 1-го станка работает без очков	0,02	$1,112 \cdot 10^{-7}$
<i>B</i>	Оператор 2-го станка работает без очков	0,02	$1,112 \cdot 10^{-7}$
<i>C</i>	Первый станок функционирует	0,8	$4,448 \cdot 10^{-2}$
<i>D</i>	Второй станок функционирует	0,8	$4,448 \cdot 10^{-2}$
<i>E</i>	Посторонние люди входят в помещение	1,0	$5,566 \cdot 10^{-2}$
<i>F</i>	Работающий подносит инструменты	0,5	$2,778 \cdot 10^{-3}$
<i>G</i>	Работающий приходит за инструментом	0,5	$2,778 \cdot 10^{-3}$
<i>H</i>	В помещение входит руководство цеха	0,01	$5,560 \cdot 10^{-4}$

Обратим также внимание, что все количественные параметры этой таблицы были предварительно аппроксимированы по следующей $L-R$ форме:

где α_i, β_i ; - симметричные относительно модального значения m_i коэффициенты размаха i -х нечетких чисел, принятые равными между собой.

Другое, кроме аппроксимации нечетких чисел $L-R$ функциями, допущение будет касаться величины размаха их восходящей (левой (*left*) - L) и нисходящей

(правой (*right*) - *R*) ветвей. Предположим, что степени принадлежности всех предпосылок изменяются от $\mu_{pi}(x_i = m_i) = 1$ - для точки пересечения ветвей соответствующей функции $x_i = m_i$ (по определению нечеткого числа) до величины $\mu_{pi}(x_i = m_i) = 0,5 \leq 0,1$ - при отклонениях нечеткой переменной на половину величины m_i , т. е. соблюдается следующее условие: .

$$\mu_{pi}(x_i = 0,5 m_i) = \mu_{pi}(x_i = 1,5 m_i) = 0,1. \quad (5.21)$$

Иначе говоря, вероятность того, что мера возможности появления исследуемых событий отклоняется, например, от заданных в табл. 5.4 ее средних значений на $\pm 50\%$, не превышает десяти процентов. При принятых допущениях подстановка этого значения в формулу (5.20) дает следующее выражение:

$$\frac{1}{1 + \left| \frac{m_i - x_i}{\alpha} \right|} = \frac{\alpha}{\alpha + 0,5 m_i} = 0,1 \quad (5.22)$$

из которого видно, что $\alpha_i = \beta_i = 0,0556 m_i$. Укажем, что именно так и были получены величины размаха нечетких чисел, приведенных в табл. 5.4.

Для априорной оценки меры возможности появления происшествия, с помощью рис. 5.9 были составлены такие формулы алгебры событий: $K = F \vee G \vee H$; $L = C \vee D$; $M = E \wedge K \wedge L$; $X = A \vee B \vee M$ и $P_X = P_A \vee P_M \vee P_B$; $P_M = P_L \wedge P_K \wedge P_E$; $P_L = P_C \vee P_D$ и $P_K = P_F \vee P_O \vee P_H$. Затем, в соответствии с уравнениями (5.14) и (5.15) получены выражения для рекурсивных множителей m_{ri} и α_{ri} необходимых для расчета модального значения возможности возникновения промежуточного исхода (событие K) – m_K и коэффициентов размаха данной нечеткой величины $\alpha_K = \beta_K$. Вычисления по ним привели к следующим результатам:

$$m_{r1} = 1 - (1 - m_F)(1 - m_G) = 1 - (1 - 0,05)(1 - 0,05) = 0,097;$$

$$m_K = 1 - (1 - m_{r1})(1 - m_H) = 1 - (1 - 0,097)(1 - 0,01) = 0,106;$$

$$\alpha_{r1} = (1 - m_F)\alpha_G + (1 - m_G)\alpha_F = (1 - 0,05)0,003 + (1 - 0,5)0,003 = 0,003;$$

$$\alpha_K = \beta_K = (1 - m_{r1})\alpha_H + (1 - m_H)\alpha_{r1} = (1 - 0,097)0,001 + (1 - 0,01)0,003 = 0,004.$$

Это означает, что мера возможности появления в опасной зоне других лиц, кроме непосредственно работающих, может быть охарактеризована следующим нечетким числом:

$$P_K = (m_K, \alpha_K, \beta_K) = (0,106; 0,004; 0,004) \quad (5.23)$$

Подобным образом рассчитываются нечеткие параметры возможности возникновения очередного промежуточного события L (появления опасной зоны вокруг двух заточных станков). После подстановки данных из табл. 5.4 в формулы (5.14) и (5.15) и проведения аналогичных преобразований, имеем:

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

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

поэтому можно утверждать, что мера возможности возникновения опасной для людей зоны определяется следующим триплетом:

$$P_L = (m_L, \alpha_L, \beta_L) = (0,960; 0,018; 0,018). \quad (5.24)$$

Третий промежуточный исход (событие M) может интерпретироваться как критическая производственная ситуация, вызванная совмещением опасной зоны (быстро летящих абразивных частиц) и незащищенных глаз людей, вошедших в помещение без очков. На модели эта ситуация связана с одновременным наступлением трех событий E , K и M . Поэтому для определения меры возможности наступления критической ситуации, необходимо воспользоваться формулами (5.12) и (5.13), подстановка в которые исходных данных дает следующие расчетные выражения:

$$\begin{aligned} m_{r1} &= m_E m_K = 1,0 \times 0,106 = 0,106; \\ m_M &= m_{r1} m_L = 0,106 \times 0,96 = 0,102; \\ a_{r1} &= m_E a_L + m_L a_E = 1,0 \times 0,004 + 0,106 \times 0,56 = 0,010; \\ a_M &= \beta_M = m_{r1} a_L + m_L a_{r1} = 0,106 \times 0,018 + 0,96 \times 0,01 = 0,012. \end{aligned}$$

следовательно, интервальная оценка меры возможности возникновения такой ситуации может быть представлена выражением:

$$P_M = (m_M, a_M, \beta_M) = (0,102; 0,012; 0,012). \quad (5.25)$$

Наконец, могут быть получены данные о возможности возникновения рассматриваемого несчастного случая (головного события дерева происшествий, представленного на рис. 5.9). Для регистрации этого исхода необходимо и достаточно появления хотя бы одного из трех событий: A , B или M . В данных условиях требуемый результат дают выражения (5.14) и (5.15), после подстановки исходных данных, в которые имеем такие зависимости:

$$\begin{aligned} m_{r1} &= 1 - (1 - m_A)(1 - m_B) = 1 - (1 - 0,02)(1 - 0,02) = 0,039; \\ m_X &= 1 - (1 - m_{r1})(1 - m_M) = 1 - (1 - 0,039)(1 - 0,102) = 0,138; \\ a_{r1} &= (1 - m_A)\alpha_B + (1 - m_B)\alpha_A = (1 - 0,02) 0,011 + (1 - 0,02) 0,011 = 0,022; \\ a_X &= \beta_X = (1 - m_{r1})\alpha_M + (1 - m_M)\alpha_{r1} = (1 - 0,039)0,012 + (1 - 0,102)0,022 = 0,032 \end{aligned}$$

Окончательное выражение для меры возможности повреждения глаз работающих (в рассматриваемой здесь ситуации) имеет такой вид:

$$P_X(x) = (m_X, a_X, \beta_X) = (0,138; 0,032; 0,032) \quad (5.26)$$

Проанализируем результаты, полученные с помощью нечеткого подхода к оценке безопасности функционирования рассмотренной человеко-машинной системы. Данный иллюстративный пример указывает на меру возможности травмирования людей, оцениваемую диапазоном изменения соответствующей частоты от 0,106 до 0,170, при наиболее вероятном ее значении 0,138. Из подобного заключения можно сделать вывод о принципиальной возможности нечеткой интервальной оценки выбранных показателей безопасности, доказывающей конструктивность приближенного оценивания техногенного риска на производстве и транспорте.

Более того, изучение содержания аналитических зависимостей (5.12)-(5.15) указывает также и на возможность составления на их основе вычислительных

алгоритмов и машинных программ. Реализованная таким образом автоматизация количественного анализа дерева происшествий при нечетко заданных исходных данных позволит не только повысить его производительность, но и всесторонне оценить влияние неопределенности этих данных на достоверность сделанных на их основе прогнозов.

А сейчас рассмотрим подход к *экспресс-оценке* техногенного риска с помощью комбинированной диаграммы, одновременно совмещающей в себе причинно-следственные связи дерева происшествия и дерева событий - его разрушительных исходов. С этой целью используем приведенную на рис. 5.10 модель появления конкретной техногенной аварии, характеризуемой пятью исходами причинения возможного ущерба – Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 и Y_4 .

В качестве этого происшествия будем рассматривать воспламенение конкретного электродвигателя из-за неисправности системы питания и предусмотренных на эти случаи защитных устройств. Как это подтверждается на рис. 5.10, ущерб от перегрева электродвигателя зависит, прежде всего, от обученности персонала действиям в аварийной ситуации и надежности средств пожаротушения. Величина же этого ущерба определяется издержками, обусловленными приостановкой работ, травмированием людей и повреждением используемого в этой ситуации оборудования.

Не приводя данных о параметрах исходных предпосылок, предположим, что вероятность PO перегрева электродвигателя за шесть месяцев (период между его ревизиями) равна 0,088, а вероятность P возникновения пожара вследствие его воспламенения 0,02. Будем также считать, что ущерб от одного часа простоя совпадает по стоимости с затратами на ремонт воспламенившегося электродвигателя и оценивается в 1000 р. каждый, тогда как в наиболее тяжелом случае - при возникновении пожара в здании и травмировании рабочих - его величина равна 5 млн. р.

Рис. 5.10. Комбинированная модель деревьев происшествия и его исходов

Пользуясь данными рис. 5.10, нетрудно рассчитать социально экономический ущерб (Y_i) и вероятности (Q_i) каждого возможного исхода рассматриваемого происшествия. Оказывается, что $Y_0 = 1000 + 2 \times 1000 = 3000$ р., а его вероятность $Q_0 = P_A(1 - P_1) = 0,086$; $Y_1 = 15000 + 24 \times 1000 = 39000$ р. и $Q_1 = P_0 P_1 (1 - P_2) = 1,53 \times 10^{-3}$; $Y_2 = 1,74 \times 10^6$ р. и $Q_2 = P_0 P_1 P_2 (1 - P_3) = 2,24 \times 10^{-4}$; $Y_3 = 2 \times 10^7$ р. и $Q_3 = P_0 P_1 P_2 P_3 (1 - P_4) = 9,41 \times 10^{-6}$; $Y_4 = Y_3 + Y_4 = 5 \times 10^7$ р. И $Q_4 = P_0 P_1 P_2 P_3 P_4 = 6,54 \times 10^{-7}$. В целом же величина прогнозируемого за полгода техногенного риска (среднего ущерба $M[Y]$ от происшествия), найденная как сумма произведений Q_i на Y_i , равна $258 + 60 + 391 + 188 + 33 = 930$ р.

В завершение данного раздела приведем еще два примера, иллюстрирующие возможность синтеза рекомендации по совершенствованию безопасности, с помощью рассмотренных ранее моделей.

В первом случае будем считать, что для повышения безопасности работ по пневмо очистке железнодорожного пути (см. рис. 5.7) предлагаются следующие четыре технических средства: 1) звуковые сигнализаторы индивидуального

оповещения людей о приближающемся поезде; 2) сигнально-блокировочная система предотвращения въезда поезда на участок работ; 3) локомотивное устройство «Спасатель»; 4) временное ограждение места работ.

Предполагается также, что указанные средства способны повлиять на предпосылки, имеющие номера 13, 8, 9 и 11 (напомним, что первая из них имеет наивысшую значимость, а все остальные равнозначны - критичность). При этом считается, что внедрение данных технических средств уменьшит соответствующие вероятности до таких величин: $P'_{13} = 0,0015$, $P'_8 = 0,004$, $P'_9 = 0,0015$ и $P'_{11} = 0,0005$. Пусть также каждое из средств защиты работающих требует для их внедрения следующих затрат: $S_{13} = S_9 = 500$ р., а $S_8 = S_{11} = 2000$ р.

Поочередная подстановка новых значений перечисленных вероятностей в приближенную формулу (5.1) дает такие значения соответствующего параметра головного события: $Q'(X_{j3}) = 0,0029$, $Q'(X_8) = 0,00347$, $Q'(X_9) = 0,00348$ и $Q'(X_{11}) = 0,003$. Сопоставление же этих средств по критерию «затраты - эффект» между собой и сравнение с прежней вероятностью травмирования $Q(X) = 0,08385$ указывают на предпочтительность внедрения звуковых сигнализаторов индивидуального оповещения и временного ограждения места работ. По крайней мере, они эффективнее двух других альтернативных средств обеспечения безопасности пневмоочистки железнодорожного пути.

Второй пример оценки эффективности мероприятий касается снижения не вероятности, а Тяжести техногенной аварии, моделируемой на рис. 5.10. В частности, оснащение там помещения дополнительным огнетушителем может снизить вероятность одновременного отказа двух таких ручных средств пожаротушения до величины $P'_2 = 0,133 \times 0,133 = 0,0179$. Подстановка же этой новой вероятности в формулы для расчета Q_i и $M[Y]$ приводит к следующим результатам: $Q'_1 = 0,00173$, $Q'_2 = 3 \times 10^{-5}$, $Q'_3 = 1,2 \times 10^{-6}$ и $Q'_4 = 8 \times 10^{-9}$; $M'[Y] = 258 + 67,5 + 52,2 + 24 + 0,4 = 402$ р., что эквивалентно снижению техногенного ущерба на величину $\Delta M[Y] = 930 - 402 = 528$ р.

Аналогичным образом могут быть выбраны столь же эффективные мероприятия, необходимые для повышения безопасности рассмотренной выше заправки, прежде всего за счет внедрения дополнительных организационно-технических мероприятий, понижающих вероятности возникновения наиболее значимых и критичных исходных предпосылок. Ожидаемые от внедрения подобных мероприятий изменения ΔP_i ($i = 12, 13, 7, 8, 5$ и 6) следует оценивать методами теории надежности в технике или теории эрготехнических систем, а обусловленный ими эффект: $\Delta P_i \rightarrow Q_i(X) \rightarrow \Delta M_i[Y]$ - только что проиллюстрированными методами моделирования опасных процессов в техносфере.

В завершение же рассмотрения методов системного анализа и системного синтеза безопасности техносферы с помощью диаграмм типа дерево, хотелось бы отметить следующее. Думается, что рассмотренные выше иллюстративные примеры подтвердили работоспособность и перспективность изложенных здесь моделей и методов исследования опасных процессов в техносфере. Более того, они показали их практическую пригодность для априорной оценки и оптимизации мероприятий по снижению техногенного риска.

Контрольные вопросы

1. Каким методом строят дерево происшествия и в чем заключается его сущность?
2. Что олицетворяют собой отдельные ветви и листья этой диаграммы причинно-следственных связей?
3. Чем отличаются процедуры построения дерева событий и дерева происшествия?
4. Сколько уровней имеет обычно дерево событий - исходов происшествия?
5. В чем состоит цель качественного анализа диаграмм типа дерево?
6. Какие известны методы качественного анализа дерева происшествия?
7. Что означает МОС и МПС и каковы их принципиальные отличия?
8. С помощью каких параметров оценивается вклад исходных предпосылок в процесс появления и предупреждения происшествия?
9. Как составляется структурная функция дерева происшествия?
10. Какова цель количественного анализа диаграмм типа дерево?
11. Можно ли использовать результаты качественного анализа при прогнозировании и снижении техногенного риска?
12. Приведите формулы расчета вероятности события, образованного конъюнкцией нескольких предпосылок.
13. Почему не всегда можно оценивать вероятность события, образованного дизъюнкцией, путем суммирования этих же параметров предпосылок?
14. В каких случаях целесообразно использовать нечеткий подход к априорной оценке вероятности техногенных происшествий?
15. Каким образом могут быть представлены параметры предпосылок, используемых при нечетком интервальном прогнозе техногенного риска?
16. Что означает аппроксимация функции принадлежности нечеткого числа L - R формой?
17. Изложите идею обоснования наиболее эффективных мер безопасности с помощью моделей типа дерево.
18. В чем заключается принцип кодирования МОС и МПС десятичными числами?
19. На чем основан экспресс-анализ риска с помощью диаграмм типа дерево?
20. Как следует организовать процедуру системного синтеза, основанную на результатах моделирования техногенных происшествий?