

Министерство образования и науки РФ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»

А.И. Багров, А.К. Муртазов

**ТЕХНОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ
И ТЕОРИЯ РИСКА**

Учебное пособие

Рязань 2010

Рекомендовано к изданию
кафедрой экологии и природопользования
РГУ имени С.А. Есенина
протокол № 1 от 9 сентября 2010 г.

Рецензент А.Ю. Прибылов, доцент кафедры информатики и вычислительной техники
РГУ имени С.А.Есенина, кандидат технических наук

Техногенные системы и теория риска / А.В. Багров, А.К. Муртазов; Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина. - Рязань, 2010. –207 с.

В учебном пособии приведен анализ последствий природных и техногенных катастроф, проанализированы оценки рисков глобальных и планетарных катастроф. Подробно рассмотрены математические основы теории систем, свойства и законы развития технических систем.

На основе теории систем подробно рассмотрены вопросы оценки риска, лежащие в основе теории безопасности технических систем, приведены математические методы анализа надежности технических систем, построения деревьев событий, отказов и решений, определения аварийных сочетаний. Рассмотрены общие принципы определения ущерба от аварий.

Приведены примеры анализа рисков опасных производственных объектов, примеры оценки возможных последствий крупной железнодорожной аварии с полной оценкой экологического и социального ущерба.

Пособие основано на материалах лекционного курса «Техногенные системы и экологический риск», читающегося автором студентам-экологам в Рязанском государственном университете имени С.А. Есенина.

©А.В. Багров, А.К. Муртазов, 2010

Содержание

Введение.....	4
I. Природные и техногенные катастрофы.....	5
1.1. Сравнительный анализ последствий природных и техногенных катастроф.....	5
1.2. Риск глобальных и планетарных катастроф.....	17
1.3. Пути преодоления противоречий между человеком и природой.....	30
II. Технические системы и их свойства.....	38
2.1. Элементы теории систем.....	38
2.2. Законы развития технических систем.....	46
2.3. Внешние факторы, воздействующие на техногенные системы	55
III. Безопасность технических систем.....	77
3.1. Определение опасности для технических систем.....	77
3.1.1. Опасность.....	79
3.1.2. Источники опасности.....	82
3.2. Риск как мера безопасности технических систем.....	88
3.3. Классификация видов риска	96
3.4. Системный анализ безопасности технических систем.....	106
3.4.1. Оценка риска при обеспечении безопасности технических систем.....	106
3.4.2. Способы прогноза техногенного риска.....	115
3.4.3. Оценка производственных рисков.....	119
3.5. Критерии приемлемого риска в техногенной деятельности.....	128
IV. Методы анализа технических систем.....	133
4.1. Методы анализа опасности технических систем.....	133
4.1.1. Построение деревьев событий, отказов и решений при анализе опасности технических систем.....	142
4.1.2. Аварийные сочетания.....	155
4.2. Методы исследования надежности технических систем.....	158
4.2.1. Математические зависимости для оценки надежности	158
4.2.2. Основные методы оценки надежности технических систем.....	166
4.3. Оценка ущерба от аварий.....	171
Литература.....	176
Приложения.....	178

Введение

В современном мире при нарастании числа техногенных катастроф роль теории риска, как в предсказании, так и оценке их экологических и социальных последствий оказывается весьма значительной.

Многообразие технических систем порождает многообразие моделей их функционирования и, соответственно, моделей отказов и моделей воздействия на окружающую среду и человека.

Дисциплина «техногенные системы и экологический риск» становится все более объемной и сложной для восприятия студентами.

В связи с этим автором подготовлено учебное пособие, в котором с учетом Государственного образовательного стандарта подготовки студентов университетов по специальностям 013100 «Экология» и 013400 «Природопользование» представлены основы учебной дисциплины «техногенные системы и экологический риск».

Выписка из ГОС ВПО

по специальностям «экология» и «природопользование»

ОПД.Ф.15	Техногенные системы и экологический риск техногенные системы, их взаимодействие с окружающей средой; оценка экологического риска; технические аварии и катастрофы; меры по ликвидации их последствий.	150
----------	--	-----

В пособии приведен анализ последствий природных и техногенных катастроф, проанализированы оценки рисков глобальных и планетарных катастроф, рассмотрены их современные модели.

Особое место уделено основам теории систем, свойствам и законам развития технических систем.

На основе теории систем подробно рассмотрены вопросы оценки риска, лежащие в основе теории безопасности технических систем.

Приведены математические методы анализа надежности технических систем, построения деревьев событий, отказов и решений, определения аварийных сочетаний.

Рассмотрены общие принципы определения ущерба от аварий.

В приложениях подробно рассмотрены примеры анализа рисков опасных производственных объектов, а также пример оценки возможных последствий крупной железнодорожной аварии с полной оценкой экологического и социального ущерба.

ГЛАВА I. ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ КАТАСТРОФЫ

1.1. Сравнительный анализ последствий природных и техногенных катастроф

(О.П. Иванов, М.Д. Рукин, Э.С. Спиридонов. - «Энергия». 2005, № 9)

Рост народонаселения. В начале XIX века численность населения составляла 1 млрд., а к 2050 г. ООН прогнозирует рост населения до 8,9 млрд. человек.

Увеличение численности городского населения. В 1830 г. в городах проживало более 3% населения, в 1960 — 34%, в 2020 г. население городов будет составлять не менее 57%.

Сейчас уже примерно половина жителей земного шара живет в городах, а территории городов занимают площадь, не превышающую 3% земной суши. На этом крохотном пятачке частоколом, плечом к плечу, стоят АЭС, ТЭЦ, химические заводы, нефте- и газопроводы, плотины водохранилищ, склады горючих и вредных веществ. Все это пронизано густой сетью транспортных артерий, закованных в бетон, железо и сталь.

Именно на территории городов, где высока плотность населения и где сконцентрирована техногенная инфраструктура, приходится наибольшее социальные и материальные потери в результате природных катастроф. В России страдают от: оползней и обвалов 752 города, от наводнений — 746, смерчей — 500, землетрясений — 103, селей — 9, цунами — 9, лавин — 5 городов.

Но люди хотят жить в городах, поэтому города постоянно расширяются и захватывают новые территории. К 2020 г. их суммарная площадь увеличится на 2.6 млн. км² и составит около 4% площади суши. Особенно быстро разрастается площадь мегаполисов. Например, территория Мехико с 1940 по 1990 г. увеличилась со 130 до 994 км². Приходится осваивать не пригодные для строительства склоны холмов, поймы рек, заболоченные участки и прибрежные территории. Конструкции возводимых зданий оставляют желать лучшего.

Вывод:

1. Надежность городских объектов падает, особенно в развивающихся странах.

2. Увеличивается риск гибели людей в городах в случае наводнений, ураганов и прочих стихийных бедствий.

Интенсивная хозяйственная деятельность порождает техногенные физические поля: вибрационные, температурные, поля блуждающих электрических токов. Наиболее опасны последние, которые образуются за счет электрифицированного рельсового транспорта, заземленных промышленных установок и станций катодной защиты. Блуждающие токи в 5-10 раз повышают коррозионное воздействие грунтов на металлические конструкции. Около 30% поврежде-

ний в трубах на территории Москвы приходится на долю коррозии от блуждающих токов. Примерно 24% площадей городов отнесены к территориям с высокой степенью коррозионной опасности, на которых электрические поля блуждающих токов в сотни раз превышают естественный фон.

Воздействие человека на окружающую природную среду. Человек извлекает нефть, уголь и газ из земных недр в огромных количествах, создает крупные водохранилища и закачивает флюиды в глубокие горизонты, изменяет местный климат. В результате — наведенная сейсмичность и увеличенная частота землетрясений, опускание территорий городов, подтопления, провалы и т.д. Примеры в цифрах: крупные землетрясения в Газли (Узбекистан), произошедшие в 1976 и 1984 гг., — наведенные, спровоцированные закачкой около 600 млн. м³ воды в Газлийскую геологическую структуру.

В северо-восточной части Токио под тяжестью зданий, динамических транспортных нагрузок и в результате извлечения подземных вод с 1920 по 1980 г. уровень земной поверхности опустился на 4,5 м. Возросла опасность затопления города нагонными водами штормов. Подобные опускания земли наблюдаются и на территориях, где добывают нефть и газ. Например, из-за добычи нефти и газа город Лонг-Бич (Калифорния) ушел в землю на 8,8 м, а горизонтальное смещение составило 3,7 м.

Примеры подтопления: в России в подтопленном состоянии находится 800 тыс. га городских территорий. Из 1092 городов подтоплены 960 (88%), включая Москву, Санкт-Петербург, Новосибирск, Омск, Томск, Хабаровск, Казань, Ярославль, Архангельск.

Некоторые эксперты связывают тенденцию увеличения частоты экстремальных погодных условий с глобальным потеплением. Во многих районах мира наблюдаются долгие периоды сильной жары, наводнения, засухи, снежные бури и т.д. Прогнозируется, что, в связи с общим потеплением климата, частота и масштабы неблагоприятных погодных явлений будут возрастать.

Пока ученые ведут теоретические споры о том, меняется или не меняется климат планеты, страховые компании пытаются решить эту проблему чисто экспериментальным путем, поскольку несут миллиардные убытки.

Можно ли эти проблемы вообще решить? Да, но для этого, во-первых, необходим точный и заблаговременный прогноз ожидаемого бедствия. Мировой опыт показывает, что затраты на прогнозирование и обеспечение готовности к природным событиям чрезвычайного характера в 15 раз меньше, чем предотвращенный ущерб.

Природные опасности должны обязательно учитываться при экономическом планировании. Прежде чем возводить сооружения, жилища, расширять города, территория должна быть оценена с точки зрения риска возникновения катастрофических событий на ней. Ученые предлагают дифференцированный подход к финансированию создаваемых объектов через систему коэффициентов. На территориях с минимальным природным риском, где стоимость меро-

приятый по его снижению невелика, макроэкономические расчеты должны включать минимальные повышающие коэффициенты затрат (несколько процентов). В то же время при освоении территорий с высокой степенью риска (например, оползневые склоны по берегам Москвы-реки) коэффициенты должны исчисляться десятками, а то и сотнями процентов.

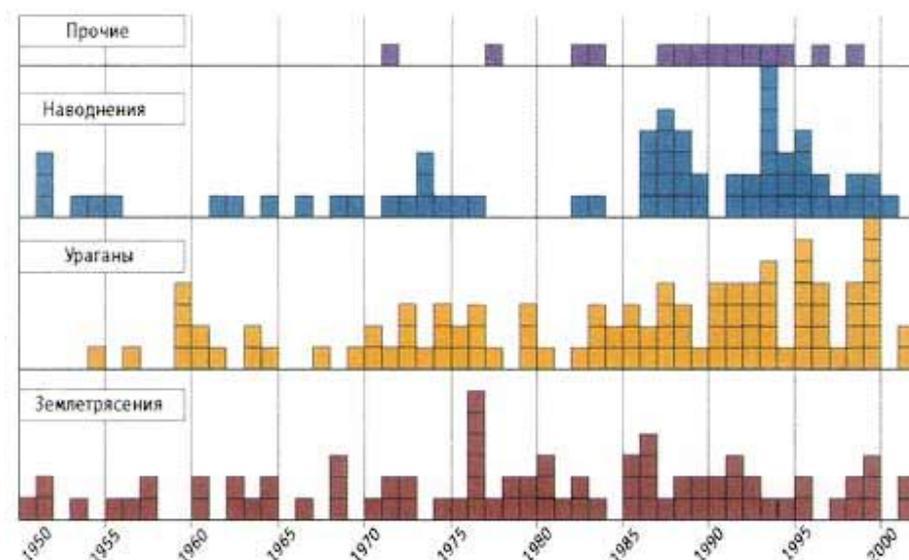


Рис. 1.1. Тенденция возрастания частоты «величайших» стихийных бедствий

Количество пострадавших от природных катастроф в 1990-х гг. возросло до 211 млн. человек в год. При тенденции относительно постоянного количества геофизических катастроф число гидрометеорологических стихийных бедствий возрастает. В 1990-х гг. более 90% жертв стихийных бедствий погибли в результате гидрометеорологических явлений, таких как ураганы и наводнения (рис. 1.1). На долю наводнений приходится две трети всех случаев, когда люди страдают от стихийных бедствий.

Сегодня наблюдается тенденция роста вероятности возникновения природных катастроф в 24 из 49 наименее развитых стран. За последние 15 лет по крайней мере в шести из них ежегодно происходило от 2 до 8 крупных природных бедствий. Примеры: с 1991 г. более половины всех стихийных бедствий зарегистрировано в странах со средним уровнем социального развития, а 2/3 всех погибших проживали в странах с низким уровнем социального развития, и только 2% от числа погибших — в развитых странах. В высокоразвитых странах в среднем в результате одного стихийного бедствия погибают 22.5 человека, а в странах со средним и низким уровнем социального развития — соответственно 145 и 1052 человека.

Денежный эквивалент природных стихийных бедствий огромен (рис. 1.2). В 1989 г. ураган Хьюго в Америке нанес ущерб страховым компаниям в размере

3 млрд. долл. А потери от урагана Эндрю в 1992 г. и вовсе достигли гигантской суммы — 15,5 млрд. долл., что привело к банкротству 7 страховых компаний. Американский журналист Дж. Палмер в статье «Стихии разбушевались» пишет: «В исследовании, проведенном страховой компанией "Тревелерс корпорэйшн", высказывается предположение, что, если к 2010 г. среднемировая температура повысится всего лишь на 0,9°C, этого будет достаточно, чтобы усилились ветры, на треть увеличилось число ураганов, обрушивающихся на побережье США, и на 30% возрос ущерб в Соединенных Штатах от стихийных бедствий».

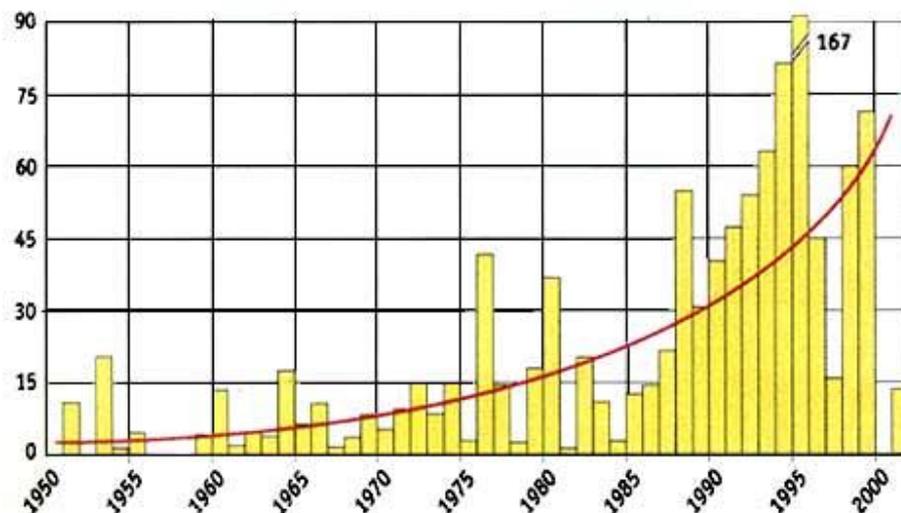


Рис. 1.2. Экономические потери от стихийных бедствий в мире с 1950 по 2000 г. (млрд. долл. США)

По оценкам исследовательской организации «Geoscience Research Group», количество природных катастроф в 1997-1999 гг. возросло на четверть по сравнению с началом последнего десятилетия ушедшего века. В 1999 г. в мире случилось 755 природных катастроф (в начале 1990-х — 600), которые нанесли экономический ущерб в 100 млрд. долл. (рис. 1.2).

Осознание растущей угрозы природных, техногенных и других катастроф побудило Генеральную ассамблею ООН еще в 1989 г. принять особую резолюцию. С 1990 г. ООН было провозглашено Международное десятилетие по уменьшению опасности стихийных бедствий. В 128 странах учреждены национальные комитеты.

В мае 1994 г. в Иокогаме (Япония) состоялась первая всемирная конференция, где рассматривались проблемы уменьшения опасности стихийных бедствий. В конференции участвовали более 2 тыс. делегатов из 146 стран.

На конференции была обнародована малоприятная статистика. С 1965 по 1992 г. от природных катастроф в мире погибли около 3,6 млн. человек, пострадали более 3 млрд., а общий экономический ущерб составил 340 млрд. долл. Но еще хуже то, что число потерь ежегодно возрастает на 6%.

Техногенные катастрофы. Большое количество крупных производственных аварий, сопровождавшихся выбросами химических и радиоактивных веществ, привлекло внимание всего мира к опасностям, особенно в таких отраслях, как транспорт, химическая промышленность и атомная энергетика. Эти катастрофические события часто имеют трансграничные последствия, и поэтому проблемы технологической безопасности касаются не только развитых стран, но и стран со средним и низким уровнем развития.

Примеры: многие новые здания в г. Измир (Турция) проектировались без учета сейсмической опасности, фундаменты домов были недостаточно прочными, чтобы выстоять во время землетрясений. В результате от землетрясения мощностью 7.4-7.8 балла по шкале Рихтера, произошедшего 17 августа 1999 г., город и его окрестности были разрушены. Ущерб от землетрясения превысил 13 млрд. долл. Погибли более 15 тыс. человек, еще 25 тыс. человек получили ранения, а 600 тыс. остались без крова. Из-за землетрясения дефицит национального бюджета в 1999-2000 гг. составил примерно 3 млрд. долл. (около 1.5% ВВП).

Во время взрыва на предприятии по производству пестицидов в Севезо (Италия) в 1976 г. произошел выброс 2, 3, 7 и 8-тетрахлородибензо-п-диоксина (ТХДД).

Для того, чтобы уменьшить ущерб от техногенных катастроф, еще в 1982 г. была принята Европейская директива по опасности возникновения крупных аварий в отдельных отраслях промышленности. Во многих странах принимаются нормативные акты в химической промышленности, направленные на предупреждение и ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций. Международная организация труда в 1993 г. разработала «Конвенцию по предупреждению крупных промышленных аварий» и «Рекомендации по предупреждению крупных промышленных аварий».

После чернобыльской аварии были приняты два важных международных договора — «Конвенция по оказанию помощи в случае ядерной аварии или радиационной чрезвычайной ситуации» и «Конвенция по раннему оповещению в случае ядерной аварии». Позднее были приняты «Конвенция по ядерной безопасности» (1994 г.), обязывающая стороны соблюдать самый высокий уровень радиационной безопасности, и «Единая конвенция по безопасному управлению отработавшим топливом и радиоактивными отходами» (1997г.).

Принимаются «Принципы Валдеза» — добровольные правила, регулирующие поведение корпораций в отношении окружающей среды. Документ требует, чтобы корпорации следовали экологически оправданной политике, повышали нормы экологической безопасности и свою ответственность за возможное вредное воздействие на окружающую среду.

Многие катастрофы имеют многоступенчатый характер, их иногда называют синергетическими. Это когда одно стихийное бедствие лавинообразно порождает другие. К примеру, в США выброс химических веществ, как оказалось, сопровождается каждой третьей природной катастрофой. А землетрясение в Эква-

доре (1987 г.) стало причиной массовых оползней, они разрушили 6 миль трансэквадорского газопровода. Экономический ущерб от этой аварии составил 1.5 млрд. долл.

Социальные катастрофы. По данным В.В. Довгуши и М.Н. Тихонова, за последние 5566 лет люди пережили 14513 войн, в которых погибли 3640 млн. человек и уничтожено ценностей на сумму свыше 115,13 квинтиллиона долл. Населению Земли этих средств хватило бы на несколько тысяч лет. Война постоянно «дорожает».

Мировая термоядерная война в считанные минуты может уничтожить все человечество. Мощность всех ядерных зарядов в 1980 г. составляла 8 тыс. Мт тринитротолуола (по 2 т на каждого жителя Земли).

В конце 1980-х гг. затраты на вооружение в мире составляли уже 1 трлн. долл. Это превышает ассигнования всех стран мира на медицину, образование и жилищное строительство.

Примером экологической катастрофы, вызванной конфликтом, являются события, которые происходили на территории Кувейта и близлежащих территорий Персидского залива после операции «Буря в пустыне» в начале 1991 г. Отступая из Кувейта, иракские оккупанты подорвали свыше 500 нефтяных буровых скважин. Значительная их часть вспыхнула и горела на протяжении шести месяцев, отравляя вредными газами и сажей большую территорию. Из буровых скважин, которые не воспламенились, нефть била фонтанами, образуя большие озера, и стекала в Персидский залив. Сюда же вылилось большое количество нефти из подорванных терминалов и танкеров. В результате нефтью было покрыто свыше 1554 км² поверхности моря, 450 км береговой полосы. Погибло множество птиц, морских черепах, дюгоней и других животных. В огненных факелах ежедневно сгорало 7,3 млн. л нефти, равное объему нефти, который ежедневно импортируют США. Тучи сажи от пожаров поднимались на высоту до 3 км и разносились ветром далеко за границы Кувейта — черные дожди выпадали в Саудовской Аравии и Иране, черный снег — в Кашмире (за 2000 км от Кувейта). Загрязнение воздуха нефтяной сажей вредно влияло на здоровье людей, так как сажа содержала много канцерогенов. Эксперты установили, что эта катастрофа сопровождалась такими явлениями:

- тепловое загрязнение (86 млн. кВт ежедневно). Такое же количество энергии выделяется вследствие лесного пожара на площади 200 га;
- сажа от горящей нефти — 12 000 т ежедневно;
- углекислый газ — 1,9 млн. т ежедневно (это составляет 2% всего CO₂, выделяющегося в атмосферу Земли вследствие сжигания минерального топлива всеми странами мира);
- SO₂ — 20 тыс. т ежедневно (что составляет 57% количества SO₂, которое ежедневно поступает из топков всех ТЭЦ США).

Раздвоение человеческого сознания сказывается в потребительском отношении к природе и ее богатствам. За тысячелетие человеческой цивилизации

великое множество видов животных и растений было уничтожено. Никакая, например климатическая, катастрофа не смогла бы так быстро истребить популяцию мамонтов, как это сделали охотники палеолита. Расчеты ученых-биогеографов свидетельствуют, что в начале палеолита на территории европейской части бывшего СССР (часть России, Украина, Белоруссия) паслось около 500 тыс. мамонтов. Люди палеолита быстро освоили метод охоты на этих гигантов с помощью ловчих ям. Горы мяса и великое множество костей для изделий доставалось им очень легко. Археологи, например, откопали вблизи с. Междуречье Черкасской области два палеолитических ярангоподобных жилища, каркасы которых были составлены из черепов и костей 130 мамонтов.

После того, как не стало мамонтов, люди были вынуждены охотиться на другого зверя — бизона, шерстистого носорога, гигантского оленя. Когда же исчерпались и эти ресурсы, пришлось братья за ум, изобрести мотыгу, перейти от охоты на животных к их выращиванию в домашних условиях, то есть совершить неолитическую революцию.

Разве не такой же логикой руководствуется человечество ныне, «осваивая» биологические ресурсы Мирового океана? Мы и сегодня действуем по принципу наших далеких палеолитических пращуров: сначала выбили китов, потом ценные виды рыб, а сегодня вылавливаем мойву, минтая, ставриду и т.п. Выращивание ценных видов морских животных и растений, так называемая марикультура — это жалкие крохи к мировому обеду. Мы отличаемся в этом вопросе от наших предков лишь тем, что бьем китов из пушек, а рыбу — вылавливаем километровыми неводами.

В настоящее время подверглось сильнейшей деградации или полностью разрушено около 30—40% почвенных ресурсов мира. Ежегодные потери почв вследствие застройки, эрозии, загрязнения достигают 10 млн. га.

У живой природы — также весомые потери. Ежедневно на планете исчезает один вид. Сейчас имеется 4000 кандидатов на внесение в список исчезающих видов.

В классической науке результаты опытов часто являются основой для новых научных выводов. В нашем случае мы вынуждены учиться на горьком опыте.

Чтобы оценивать разрушительную силу катастроф и планировать защитные и восстановительные работы, нужна единая шкала для сравнения катастроф между собой. Однако различная природа катастроф не позволяет непосредственно сопоставлять их между собой. Невозможно сопоставить землетрясения, извержения вулканов, ураганы, где основной поражающий фактор — величина энергии, с катастрофами, обусловленными квазистабильным негативным состоянием природы, в частности атмосферы (засухи, наводнения, похолодания и др.). Только оценка ущерба дает универсальный путь сопоставления. В этом случае интенсивность катастрофы оценивается по двум категориям — числу жертв и объему ущерба.

Социальный ущерб обычно измеряется числом жертв, раненых и пострадавших в очаге чрезвычайной ситуации. В отношении раненых и пострадавших все понятно: достаточно оценить затраты на их лечение. А вот как оценить погибших? Можно оценить национальное богатство страны, стоимость личного имущества граждан, земельные и лесные ресурсы, разведанные минеральные ресурсы, интеллектуальные богатства и сумму разделить на число жителей, получив цену одной жизни. Но такие попытки оказались безрезультатными.

В государстве Бахрейн, где численность населения невелика, а доходы от нефти и ее запасы значительны, стоимость жизни будет намного выше. Учитывая несовершенство данной методики, в мире практикуется просто подсчет числа погибших при катастрофах.

Косвенный социальный ущерб возникает из-за потери доверия людей к способности руководства защитить их от бедствий.

Прямой экономический ущерб заключается в непосредственной потере зданий, сооружений, оборудования, урожая, скота. Иногда сюда же включают и социальный ущерб.

Косвенный экономический ущерб — это нарушения нормального режима хозяйственной деятельности вне зоны разрушений из-за изменений функционирования энергетических, транспортных и других коммуникаций и предприятий-смежников, непредвиденного отвлечения средств на аварийно-спасательные и восстановительные работы.

Экологический ущерб — фактические и возможные убытки в их количественном выражении, включая упущенную выгоду и дополнительные затраты на ликвидацию неблагоприятных последствий для жизнедеятельности человека, животных, растений, состояния экологических систем из-за нарушения экологических нормативов, а также техногенных аварий и катастроф.

Косвенный экологический ущерб — загрязнение окружающей среды вследствие разрушения стихией предприятий, на которых используются или производятся опасные для здоровья людей и природы материалы.

Величина и соотношение разных видов ущерба зависят от:

- плотности населения или степени урбанизации;
- степени подготовленности населения к стихийным бедствиям;
- характера и технологии объектов народного хозяйства.

Обычно публикуемые сведения о потерях при стихийных бедствиях характеризуют лишь прямой ущерб. А косвенный ущерб от чернобыльской катастрофы в 20-25 раз больше прямого.

По изложенной выше методике был проведен анализ различных типов катастроф и получены результаты, которые подтвердили, что на первом месте (по абсолютному числу жертв) стоят наводнения. Например, в 1959 г. в Северо-Восточном Китае от наводнения погибли 2 млн. человек. В 1887 и 1931 гг. в результате прорыва дамб на реках Хуанхэ и Янцзы погибли 900 тыс. и 1 млн. человек соответственно. От тропических циклонов, тайфунов, наводнений и ура-

ганов за период с 1947 по 1960 г., по данным ЮНЕСКО, погибли 2,9 млн. человек. Убытки составили примерно 100 млрд. долл. При крупных стихийных бедствиях в 1900-1990 гг. погибли 8 млн. человек (в среднем по 90 тыс. в год), в том числе от наводнений — около 52%.

Системный подход к оценке ущерба. В любом случае экстремального проявления стихийного явления или возникновения чрезвычайной ситуации весьма важно выделение той надсистемы, в пределах которой распространены прерванные связи и выявлены поражения ее подсистемы. Это нужно для реальной оценки всего ущерба самой надсистемы и разработки предложений по ее восстановлению. Поясним ситуацию несколькими примерами. Землетрясение в Спитаке в 1989 г. явилось для Армении действительно катастрофой — свыше 25 тыс. жертв и огромный материальный ущерб. Армения как самостоятельная страна (система) до сих пор не в состоянии справиться с последствиями землетрясения. Но дело обстояло бы еще хуже, если бы в этот критический момент не была оказана международная помощь. В то же время для всего человечества это событие стоит на уровне локального явления, не влияющего существенным образом на судьбы всего мира, так как человечество — это гигантская надсистема и события в ее небольшой подсистеме не разрушают общей устойчивости. Следовательно, совершенно необходим принципиально иной системный подход, позволяющий ранжировать степень опасности любых воздействий катастрофических природных процессов. В медицине давно известно, что при поражении ожогом кожи человека на 70% ситуация становится для системы человека критической. Она может стать критической и для семьи, если погибающий человек — ее единственный кормилец. Это горе для родственников пострадавшего, его знакомых и сослуживцев. Но дальше системный охват не распространяется.

Поэтому отнесение результатов поражения и ущерба к конкретной административно-политической системе (район, область, страна и т.д.) позволяет правильно оценить пределы ее поражения. Весьма важны темпы помощи, так как развитие любого опасного процесса сопровождается каскадом сопутствующих неблагоприятных явлений и любое промедление увеличивает цепь негативных последствий, усиливая тем самым размеры воздействия и ущерба. Одним из наиболее распространенных путей учета общих потерь для любой страны как системы является сопоставление размеров потерь на ликвидацию последствий от природных бедствий с размером ВВП страны.

Засухи и голод также могут стать причиной гибели большого количества людей. За последние 10 лет ущерб от землетрясений составил 30% от общего объема ущерба, наносимого всеми стихийными бедствиями, в то время как на их счету оказалось только 9% жертв. А голод унес жизни 42% людей, погибших во всех бедствиях, хотя доля ущерба, по оценкам, составляет всего лишь 4%. Подсчитано, что в 1999 г. общие финансовые потери от всех катастроф превысили 100 млрд. долл. Всего в этом году было зарегистрировано 707 крупных катастроф, в то время как в предыдущие годы их было от 530 до 600. Но самое

удивительное, что по сравнению с 1960-ми гг. количество природных бедствий в 1990-е гг. увеличилось в 3 раза, а экономические потери возросли за этот же период почти в 9 раз.

С 1995 по 1997 г. ликвидация последствий природных бедствий обходилась США в 50 млрд. долл. в год. Экономические потери этой страны от течения Эль-Ниньо в 1997-1998 гг. оцениваются в 1,96 млрд. долл., или 0.03% ВВП. Финансовые потери Эквадора были такими же, но составили 11.4% его ВВП. В результате наводнений в 1991, 1994-1995 и 1998 гг. Китай потерял от 20 до 30 млрд. долл. С 1989 по 1996 г. ежегодные потери от природных бедствий в Китае оцениваются в пределах от 3 до 6% ВВП (в среднем 3.9% в год). В декабре 1999 г. ураганы Анатоль, Лота и Мартин нанесли странам Северной Европы ущерб в 5-6 млрд. долл. В случае стихийного бедствия слаборазвитые страны с мало диверсифицированной экономикой и плохой инфраструктурой не только должны полагаться главным образом на внешнюю помощь, но им требуется и больше времени на восстановление собственной экономики. В промышленно развитых странах правительства, местные органы власти и отдельные люди имеют больше возможностей справиться с последствиями стихийных бедствий, экономические потери в определенной степени компенсируются разнообразием экономики, а значительная часть имущества застрахована.

В качестве высшей иерархии социальных систем наиболее удобным был бы глобальный учет и негативных последствий, и возможностей всего социума, однако социальный и экономический ущерб от катастроф с трудом поддается оценке в глобальном масштабе. Страховые иски о возмещении ущерба от стихийных бедствий часто не дают реальной картины экономических потерь. Например, ущерб от наводнений в Австрии, Германии и Швейцарии в 1999 г. был компенсирован страхованием только на 42.5%. А в Венесуэле в том же году ущерб от наводнения был возмещен лишь на 4%. Необходимо иметь достоверные и систематические данные о стихийных бедствиях для того, чтобы оценить их социально-экономические и экологические последствия как на ближайший, так и на отдаленный периоды.

Международные меры. Вплоть до 1970-х гг. международное сообщество рассматривало катастрофы как исключительные обстоятельства, с последствиями которых на местном уровне справиться невозможно и требуется помощь извне. Термин «управление катастрофами», как правило, подразумевал ликвидацию их последствий, чем занимались главным образом такие организации, как Общество Красного Креста и Красного Полумесяца или национальные органы гражданской обороны.

В 1971 г. для привлечения и координации деятельности всех возможных сил и средств во время бедствий при ООН было создано Бюро помощи пострадавшим от стихийных бедствий (в настоящее время — Бюро ООН по координации гуманитарной помощи). Концепция подготовки к стихийным бедствиям разрабатывалась в 1970-1980 гг. Она охватывает проблемы обучения и некото-

рые межотраслевые действия, направленные на то, чтобы повысить эффективность спасательных работ и мероприятий по ликвидации последствий стихийных бедствий и восстановлению нормальной жизни на пострадавших территориях. Но даже самые пессимистические прогнозы не смогли предвидеть роста числа природных катастроф в конце XX века.

В настоящее время правительство Китая меняет приоритеты в своей политике по отношению к проблеме катастроф. Вместо усилий по ликвидации их последствий основное внимание будет направлено на предотвращение ущерба и снижение опасностей и рисков от таких бедствий. Последние 10 лет координация работ в этой области осуществлялась Китайским национальным комитетом, в состав которого входят представители 20 министерств, департаментов и комиссий. В 1989 г. Китайский национальный комитет разрабатывает национальный план по снижению ущерба от природных стихийных бедствий на 1998-2010 гг. Кроме того, Китай помогал разрабатывать и координировать планы и мероприятия по сокращению ущерба от стихийных бедствий на национальном и местном уровнях.

Осознав масштабы наводнений 1991 г., правительство Китая пришло к выводу о необходимости включить задачу сокращения ущерба от стихийных бедствий в комплексный план экономического и социального развития. Сейчас при Китайской академии наук образован Национальный центр по сокращению ущерба от стихийных бедствий, который занимается сбором и изучением данных. Результаты своих исследований Центр передает в Государственный совет для подготовки и принятия решений.

В 1999 г. Китай пережил самые страшные за последние сто лет наводнения, от которых пострадали свыше 300 млн. человек. Но благодаря тем 7,6 млрд. долл., которые после разрушительного наводнения 1998 г. были затрачены на защитные мероприятия, наводнение 1999 г. на реке Янцзы стало не таким разрушительным, каким оно могло бы быть (хотя уровень воды и превысил отметки предыдущего года).

1990-е гг. были объявлены Международным десятилетием уменьшения последствий стихийных бедствий, одной из главных целей которого был переход от примитивных методов предупреждения о возможных природных бедствиях к методам, основанным на широком применении известных научных знаний и новейших технологий повышения информированности населения. Генеральный секретарь ООН Косри Аннан по этому поводу сказал: «Прежде всего, мы должны перейти от методов реагирования к методам предупреждения. Человечество проводит замечательную работу по ликвидации последствий стихийных бедствий. Но самая главная задача в средней долгосрочной перспективе — усилить и расширить программы, которые в первую очередь способствуют сокращению количества стихийных бедствий и ущерба от них. Предупреждение не только более гуманно, нежели ликвидация последствий, но и значительно дешевле». В ходе Международного десятилетия уменьшения последствий сти-

хийных бедствий удалось повысить внимание к проблеме снижения риска возникновения чрезвычайных ситуаций при разработке общей политики, а также наметить ряд первоочередных мер, которые страны и регионы должны осуществить в XXI веке.

Планета засорена химическими, биологическими, радиационными и другими токсинами. Меняется бактериальная, вирусная, грибковая флора внутри и вне организма человека. Идут межвидовые «горячие» и «холодные войны». Быстро изменяется чувствительность организма человека и животных к обычным, казалось бы, нетоксичным веществам, возникают аномальные формы непереносимости, которые все еще традиционно диагностируются как иммунные дефициты.

Современная статистика учитывает уже не менее ста видов катастроф, частота и разрушительная сила которых имеет выраженную тенденцию к росту. МЧС России и аналогичные структуры за рубежом контролируют не более 5-10% этого катастрофического потока. Катастрофы становятся новой проблемой естествознания.

Защита от катастроф — важнейшая обязанность развитого общества и высшая цель существования сообщества стран и народов. Сама внезапность катастрофы — показатель недостаточного интеллектуального уровня человечества. Катастрофа никогда не бывает внезапной. Существуют и циклические катастрофы, которые повторяются через определенные промежутки времени, и их можно прогнозировать.

Сегодня лишь малое число стран способно приблизиться к чисто практическим задачам предсказания и смягчения последствий катастроф из-за грандиозных интеллектуальных и материальных затрат.

Тем не менее, уже есть вузовские и школьные учебники, в учреждениях — ведомственные руководства, разработанные применительно к нуждам авиации, флота, железнодорожного транспорта. Имеются книги о самоспасании человека не только в океане, горах или пустыне, но и в собственном доме, родном городе, на производстве. Формируется медицина катастроф. И поэтому прикладная теория опасных природных, техногенных и социальных процессов уже начинает перерастать в новое научное направление — науку о катастрофах.

1.2. Анализ рисков планетарных и глобальных катастроф

(Н.А. Махутов)

На базе исследований и разработок последних 15 лет в рамках Государственной научно-технической программы «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф» (ГНТП «Безопасность» 1991-2001 г.г.), Федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций

природно-техногенного характера в Российской Федерации» (ФЦП «Снижение рисков» 2001-2010 г.г.), Федеральной целевой научно-технической программы «Исследование и разработка по приоритетным направлениям развития науки и техники» (ФЦНТП «Исследования и разработки науки и техники» (2002-2006 г.г.), были сформулированы основные закономерности возникновения и реализации рисков, методы и классификация основных параметров риска $R(t)$. Они представлены как функционалы F_R от вероятностей $P(t)$ возникновения катастроф и соответствующих им ущербов $U(t)$, зависящих от времени t

$$R(t) = F_R \{P(t), U(t)\} = \sum_i [F_{Ri} \{P_i(t), U_i(t)\}] = \int_{t,x,y,z} \{P(t), U(t)\} dt, \quad (1.1)$$

где i – набор (классификатор) опасных процессов и явлений при суммировании рисков для данного момента (отрезка) времени t для заданной территории; t, x, y, z – сочетание по времени t по пространственным координатам x, y, z опасных процессов при интегральных оценках рисков.

Обобщение на протяжении интервала времени t , равного примерно последнему полувеку, значительной по объему информации о величинах суммарных осредненных $U(t)$, измеряемых в экономических показателях (долларах, рублях), и об осредненной периодичности Δt между авариями и катастрофами с заданным уровнем ущербов, измеряемой во временных показателях (годах), позволяет построить соответствующую классификационную картину аварий и катастроф. При этом можно принять $P(t)=1/\Delta t$. Тогда риски $R(t)$ на базе обобщения статистической информации по рис. 1.3 будут определяться как

$$R(t) = U(t) / \Delta t, \text{ долл/год.} \quad (1.2)$$

На основе анализа последствий U , периодичности и вероятности P аварий и катастроф и связанных с ними рисков можно выделить их следующие классы (рис. 1.3): планетарные, глобальные, национальные, региональные, местные, объектовые и локальные. По мере развития человечества и его возможностей в промышленной и военной сферах все больше возрастают риски тяжелых аварий и катастроф и их перехода от нижних уровней к верхним.

Планетарные катастрофы с возможностью гибели жизни на Земле связываются с такими катастрофическими природными явлениями, как столкновение Земли с крупными астероидами, имеющими скорости движения до 80 км/сек, а также с полномасштабными военными действиями с применением современного ядерного, термоядерного и химического оружия массового поражения.



Рис. 1.3. Типы аварий, катастроф и рисков

Глобальные катастрофы могут затрагивать территории ряда сопредельных стран; периодичность таких катастроф оценивается в 30-40 лет и более, число пострадавших в них более 100 тыс., а экономический ущерб может превышать 100 млрд. долл. Такие последствия связываются с крупномасштабными техногенными катастрофами на ядерных реакторах гражданского и военного назначения с расплавлением активной зоны, на предприятиях ядерного цикла, на ядерных боеголовках, на мощных ракетносителях, на атомных подводных лодках и надводных судах, на складах с химическим оружием и на крупных химических предприятиях с большими запасами сильно действующих ядовитых отравляющих веществ. Природными катастрофами с глобальными последствиями являются крупные землетрясения, извержения вулканов, наводнения, цунами.

Национальные катастрофы затрагивают территории отдельных стран; их периодичность может характеризоваться временем 15-20 лет; при этом число жертв и пострадавших более 10 тыс. человек, а экономические ущербы достигают 10 млрд. долл. и более. Такие катастрофы могут возникать на указанных выше объектах, а также при транспортировках больших масс людей и опасных грузов, на пересечениях магистральных трубопроводных систем с транспортными линиями и линиями электропередач, при пожарах на крупнейших промышленных и гражданских комплексах, при падениях самолетов на опасные объекты, при разрушениях крупных плотин и дамб. Сюда относятся землетрясения, ураганы, наводнения.

Катастрофы регионального масштаба захватывают территории целых республик, краев и областей; их периодичность оценивается в 10-15 лет. Число жертв и пострадавших в них может превышать тысячу человек, а экономический ущерб 1,0 млрд. долл. Такого рода катастрофы вызываются теми же причинами и имеют те же последствия, что и национальные катастрофы. Дополни-

тельно к ним можно отнести взрывы и пожары на объектах с опасными веществами, при крушениях поездов, судов и самолетов, при взрывах на металлургических комплексах, элеваторах, шахтах, а также опасные природные процессы.

Местные аварии и катастрофы создают ущербы для городов и районов. Частота их возникновения существенно выше - менее одного года; пострадавшими в них оказываются сотни людей, а экономический ущерб достигает 100 млн. долл. Спектр основных причин и источников локальных аварий и катастроф дополняется обрушениями и пожарами на промышленных и гражданских сооружениях, при локальных выбросах радиоактивных и отравляющих веществ. Такого рода катастрофы создаются опасными природными процессами: ливнями, ураганами, карстами, оползнями.

Объектовые аварии и катастрофы ограничиваются территориями санитарно-защитных зон объекта; частота таких аварий и катастроф характеризуется временем до одного месяца; число жертв и пострадавших находится на уровне десятков, а экономический ущерб - на уровне миллиона долл. Наиболее частыми здесь являются пожары, взрывы, столкновения и крушения транспортных средств, обрушения, провалы.

Локальные аварии возникают на определенной части объекта. Частота этих аварий достаточно велика и их число измеряется сотнями и тысячами в год. Ущерб от этих аварий составляет от единиц до сотен тысяч долл. на одну аварию. При локальных авариях могут страдать люди, получая увечья. Характерными видами техногенных локальных аварий являются взрывы, пожары, обрушения.

Такая классификация аварий и катастроф позволяет более ориентированно вести разработки методов и систем их анализа, прогнозирования и предотвращения.

Величины ущербов U связываются с типом неблагоприятного события и могут измеряться большим числом параметров. При оценках планетарных и глобальных рисков ущербы U могут оцениваться числами пострадавших людей N или экономическими потерями E (в рублях). Для рисков природно-техногенных и техногенных катастроф можно в двойных логарифмических координатах построить обобщенные кривые « $P-U$ », типа « $F-N$ » кривых (рис. 1.4). При этом величины P и U получаются суммированием P_i и U_i , задача снижения рисков сводится к снижению P и U до допустимых значений $[P]$ и $[U]$.

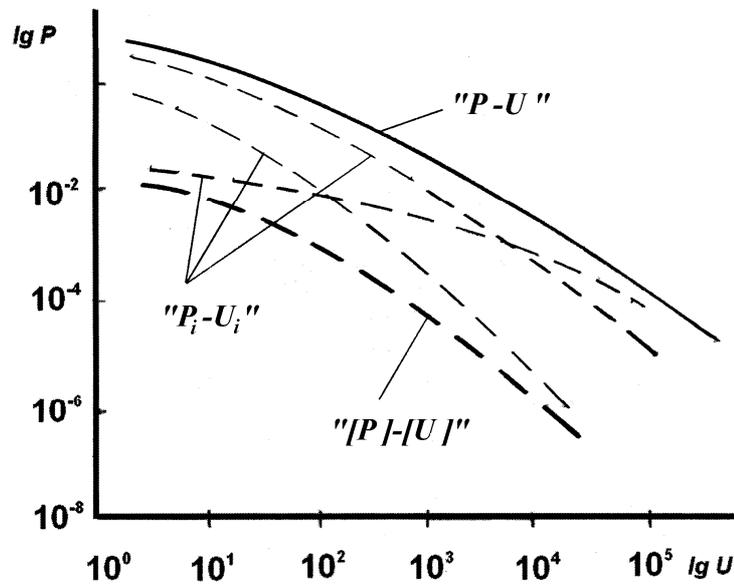


Рис. 1.4. Обобщенные кривые для оценки интегральных и дифференциальных рисков

Фундаментальным свойством интегральных (для всей техносферы) и дифференциальных (для данного вида объектов техносферы) рисков является то, что росту ущербов U соответствует снижение вероятности P (частоты) их возникновения, и диапазон изменения у величины P больше (на 1-2 порядка), чем у величины U . Дифференцированные риски при их анализе и классификации связываются с источниками рисков и сферами жизнедеятельности.

Величины первых и вторых рисков измеряются в относительном числе летальных исходов на тысячу человек в год или в относительной доле ВВП, характеризующей экономические потери в год.

Анализ усложнения и насыщения потенциально опасными объектами техногенной сферы всех промышленно развитых стран в ушедшем столетии показал, что рост числа и тяжести последствий техногенных катастроф подчиняется экспоненциальному закону. Возможности парирования угроз в техногенной сфере оказались ограниченными, несмотря на выдающиеся достижения научно-технического прогресса практически во всех областях гражданской и оборонной промышленности.

Такие объекты техногенной сферы, как атомные и термоядерные энергоустановки, ракетно-космические системы, ядерное и химическое оружие массового поражения, транспортные воздушные, морские и наземные системы, гиганты энергетического и химического комплексов, магистральные нефте-, газо-, продуктопроводы позволили, с одной стороны, преобразить возможности во всех областях деятельности мирового сообщества и, с другой, создали неприемлемо высокие риски дальнейшему существованию человечества.

Проблемы оценки рисков при возникновении катастроф природного и техногенного характера приобрели особую актуальность в начале XXI века. Если принять, что история человеческого существования измеряется 1,5-2,5 млн. лет, то для человека потенциальные опасности природного происхождения характеризуются выраженным наложением цикличности на медленно (на протяжении сотен миллионов и миллиардов лет) и монотонно протекающие процессы на Земле и в космосе. Глобальные изменения состояния земной поверхности, мирового океана и климата на Земле в связи с гелио-геопроцессами характеризуются большими циклами от 10-20 тыс. лет до 500-1100 тыс. лет и более. Они вызывают глобальные потепления и похолодания, вариации положения земной оси, магнитного поля, состояния атмосферы, стратосферы и ионосферы.

На эти монотонные и циклические процессы могут накладываться случайные (с чрезвычайно малой вероятностью до 10^{-8} - 10^{-9} в год) планетарные природные катастрофы, обусловленные весьма большими (близкими к взрывным) изменениями активности Солнца, прохождением планет через астероидные и метеоритные пояса с возможными их столкновениями.

Указанные выше монотонные, циклические и случайные процессы Земного и космического масштаба приводят к кардинальным изменениям условий жизни на Земле. Несмотря на неизмеримо возросшие возможности человека противостоять природным и техногенным угрозам, закономерности и параметры этих процессов очень сложны в исследовании и количественном описании. В связи с этим такого рода глобальные катастрофы, затрагивающие все человечество и все живое на Земле, должны быть пока отнесены к гипотетическим, а степень реально прогнозируемой защищенности от них чрезвычайно мала. Последствия такого рода общепланетарных катастроф могут оцениваться как предельные, когда вероятность уничтожения жизни на Земле приближается к 100%. В этом случае риск летального исхода, обычно измеряемый числом смертей на 1000 человек, также составит 10^3 . При общем числе жителей на Земле в настоящее время порядка $5 \cdot 10^9$ и вероятности возникновения общепланетарных природных катастроф в 10^{-6} - 10^{-9} 1/год, риск летального исхода для человека при такой катастрофе составляет $5 \cdot 10^0$ - $5 \cdot 10^3$, а риск уничтожения жизни будет 10^{-6} - 10^{-9} 1/год.

Глобальные природные катастрофы, обусловленные природными процессами на Земле и затрагивающие территории ряда стран и континентов (землетрясения, извержения вулканов, цунами, ураганы), зарегистрированы за период 10^3 - 10^4 лет с человеческими жертвами до 10^6 чел. При средней численности населения на период таких катастроф до $5 \cdot 10^8$ риск летального исхода для одного жителя Земли составляет от $2 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-7}$ 1/год или $2 \cdot 10^0$ на одну тысячу. Необратимый ущерб живому при этих катастрофах возникал на ограниченных территориях – до $5 \cdot 10^{-6}$ - 10^{-7} от площади поверхности Земли. Тогда риск уничтожения жизни на Земле при таких катастрофах можно оценить, как $(2-5) \cdot 10^{-10}$

1/год. Риск уничтожения жизни на 1-2 порядка меньше, чем при общепланетарных природных катастрофах; риск летального исхода при этом меньше в $5 \cdot 10^{-2}$ раза.

Можно принять, что реальные техногенные угрозы для человека (пожары, взрывы, обрушения) на протяжении последних 10^4 - 10^3 лет стали значительными только в последние столетия, когда началось интенсивное гражданское строительство поселений, плотин, акведуков, дамб. Крупные пожары в древнеримских и средневековых городах возникали с периодичностью 50-100 лет и гибелью в них до 10^3 человек и более. В этом случае риск летального исхода составлял $(1-2) \cdot 10^{-7}$ 1/год или $2 \cdot 10^{-2}$ на 1000 жителей. В последние десятилетия риск летального исхода при техногенных катастрофах в силу ускоренного развития техногенной сферы и неподготовленностью человечества к защите от них резко возрос и стал достигать $(2-3) \cdot 10^{-1}$ на 1000 жителей. Эти риски становятся сопоставимыми или превосходят риски гибели людей при всех видах природных катастроф, составляющих $(0,3-0,5) \cdot 10^{-1}$ на 1000 жителей.

Величины P для планетарных катастроф могут составлять от 0,001 до 0,02 1/год, для глобальных катастроф составляют $0,02 \div 0,03$ 1/год, для национальных - $0,05 \div 0,1$ 1/год, для региональных $0,5 \div 0,1$ 1/год, для местных - $1 \div 20$ 1/год, для объектовых - $10 \div 500$ 1/год. Величины U , включающие материальный, нематериальный, прямой, косвенный, экономический элементы ущерба, для указанных классов катастроф снижаются от $10^{14} \div 10^{12}$ до $10^5 \div 10^3$ долл. на одну катастрофу (рис. 1.5).

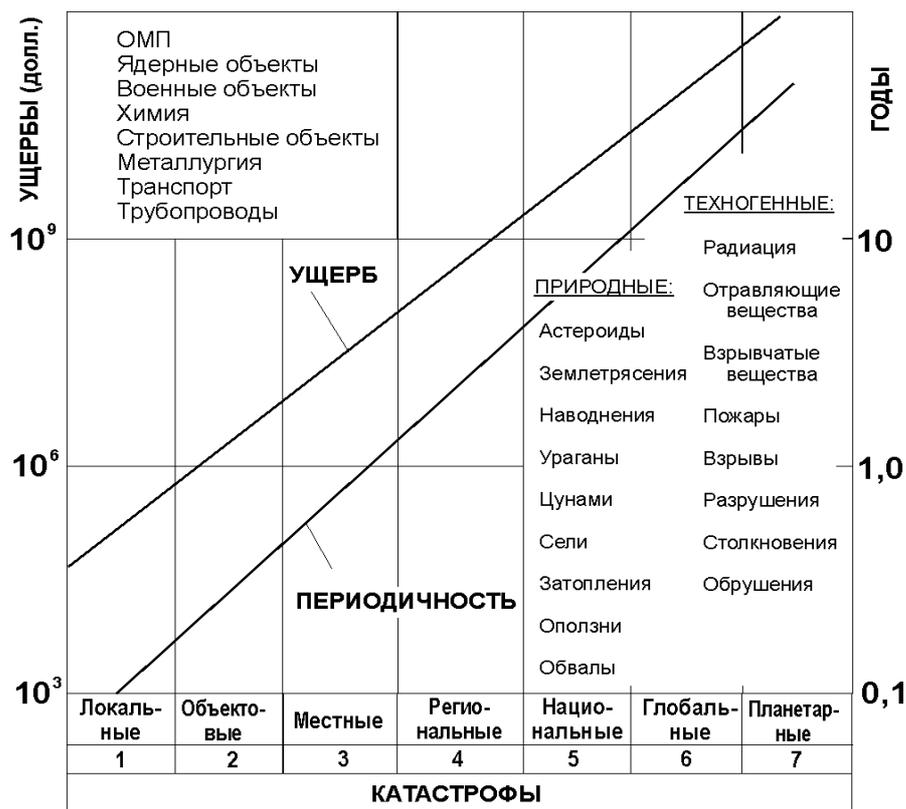


Рис. 1.5. Ущерб и периодичность техногенных катастроф

Таким образом, вариация P достигает семи порядков, а единичных ущербов U —десяти порядков. Риски погибнуть или получить увечья в каждой из указанных катастроф измеряются общим числом пострадавших от 10^6 до 10^0 , т.е. изменяются на шесть порядков. В соответствии с этими данными совокупные риски от единичных техногенных катастроф могут изменяться в пределах от $2 \cdot 10^8$ долл./год до $5 \cdot 10^5$ долл./год.

Вместе с тем, важной особенностью техногенных катастроф является число катастроф каждого из указанных выше классов (рис. 1.6).

Наиболее тяжелые катастрофы глобального или национального масштаба возникают на уникальных объектах техногенной сферы (атомные реакторы, атомные подводные лодки, ракетно-космические системы).

По мере снижения тяжести единичной катастрофы число объектов техно-сферы N_i увеличивается от единичных ($N_i \approx 10^0$) и мелкосерийных ($N_i \approx 10^2$) до крупносерийных ($N_i \approx 10^4$) и массовых ($N_i \approx 10^5$).

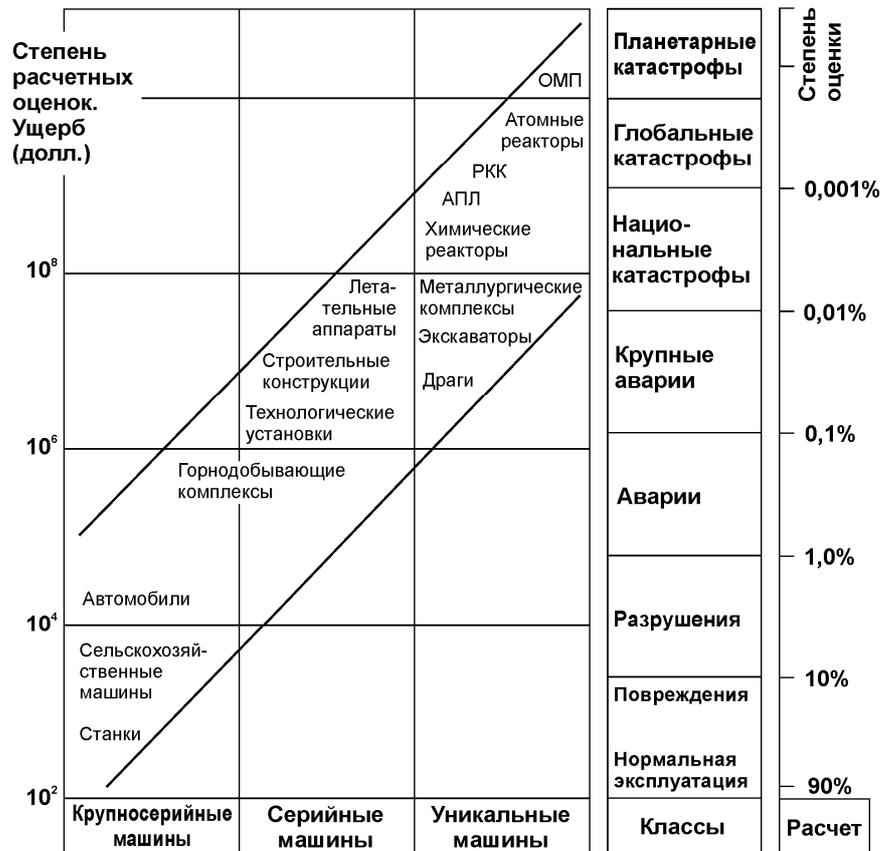


Рис. 1.6. Ущерб на одну катастрофу от необеспечения надежности и безопасности

В среднем для России в последние годы на одну национальную катастрофу ($i=3$) приходится около 5 региональных ($i=4$), около 100 местных ($i=5$) и около 500 объектовых ($i=6$). Тогда на основе (1) для всей техносферы можно оценить риск

$$R = \sum_{i=1}^7 R_i = \sum_{i=1}^7 (P_i \cdot U_i) N_j, \quad (1.3)$$

где i – порядковый номер класса катастроф по рис. 3, P_i , U_i – вероятность возникновения и ущерб от одной катастрофы i - класса.

В целом интегральные стратегические риски для России по выражению (1.1) для катастроф, с учетом их числа и ущербов, могут достигать 8÷12 млрд. дол. в год, что составляет значительную часть V_R внутреннего валового продукта V

$$V_R = R/V. \quad (1.4)$$

Величина V_R , по обобщенным данным о техногенных катастрофах, может составлять 0,02-0,07, достигая в отдельные периоды времени величин на уровне $0,06 \div 0,12$.

В ряде случаев тяжелые катастрофы (типа цунами в Юго-Восточной Азии) приносят ущербы на уровне 100-160 млрд. долл.; при этом величина V_R для отдельных стран достигает 0,5-0,8

Количественный и качественный анализ функционалов U в выражении (1) на базе сложных динамических нелинейных моделей должен предусматривать построение физических и математических сценариев как самих аварий и катастроф, так и моделей повреждений, наносимых ими населению (D_N), техническим объектам и системам (D_T) и среде обитания (D_S)

$$U = F_U \{D_N, D_T, D_S\} \quad (1.5)$$

Каждое из указанных повреждений может находиться в прямом, диссипативном или синергетическом взаимодействии, определяя меры хаоса и порядка в социальной, техногенной и природной сферах. Величины U в выражениях (1.1) и (1.4) могут измеряться большим числом определяющих параметров (индивидуальные и коллективные риски, продолжительность жизни для населения, степень разрушения и вывода из эксплуатации объектов и систем, уничтожение объектов и систем, кратко- и долгосрочное загрязнение окружающей среды).

Аналогично (1.5) можно записать выражение для оценки вероятностей возникновения техногенных катастроф

$$P = \{P_N, P_T, P_S\}, \quad (1.6)$$

где P_N, P_T, P_S - вероятности, обусловленные действиями человека, объектов техносферы и окружающей среды.

Исключительно важное значение приобрели в последние годы исследования роли человеческого фактора в формировании параметров риска U_N и P_N для анализа всей безопасности сферы жизнедеятельности. Эти исследования позволили представить величину, как определенную значительную долю P

$$P_N = \sum k_N \cdot P, \quad (1.7)$$

где k_N – коэффициент значимости человеческого фактора в различных областях техносферы ($k_N \leq 1$).

Для предварительных оценок величин P_N значение k_N можно принять по данным табл. 1.1.

Таблица 1.1

Коэффициент k_N значимости человеческого фактора		
№	Области техносферы	k_N

1.	Атомная энергетика	0,55
2.	Промышленное и гражданское строительство	0,70
3.	Ракетно-космическая техника	0,35
4.	Военная авиация	0,85
5.	Гражданская авиация	0,65
6.	Трубопроводный транспорт	0,30
7.	Автомобильный транспорт	0,80
8.	Технологическое оборудование	0,40

Все возрастающая роль человеческого фактора P_N определяется значительным набором причин и источников возникновения техногенных катастроф

$$P_N = \sum P_{Ni} = \sum_1^N k_{Ni} \cdot P_N, \quad (1.8)$$

где k_{Ni} - относительная доля влияния человеческого фактора ($k_{Ni} \leq 1$).

Для области гражданского строительства величины приведены в табл. 2.

Таблица 1.2

Структура влияния человеческого фактора

№	Источник проявления человеческого фактора	k_{Ni}
1.	Неиспользование знаний	0,35
2.	Недостаток знаний	0,25
3.	Недостаток знания факторов P_T, P_S	0,15
4.	Ошибки и промахи	0,10
5.	Неизвестные ситуации	0,05
6.	Прочие	0,10

Проявление человеческого фактора относится ко всем трем основным j стадиям жизненного цикла во времени τ объектов техносферы – проектированию ($j=1$), изготовлению ($j=2$) и эксплуатации ($j=3$):

$$P_N = \sum_j k_{ji}^N \cdot P_N, \quad (1.9)$$

где k_{ji}^N - коэффициент влияния человеческого фактора на заданной стадии жизненного цикла.

Для гражданского строительства величины k_{ji}^N ($j=1, 2, 3$) соответственно равны 0,40; 0,50; 0,10, для авиации – 0,10; 0,20; 0,70. При этом внутри каждой

стадии жизненного цикла существует свой набор составляющих k_{ij}^N . Так, для гражданской авиации для стадии эксплуатации ($j=3$) составляющие k_{ij}^N равны:

для пилотов и экипажей в полете	0,70÷0,75;
для диспетчеров и управляющих воздушным движением	0,03÷0,06;
для работников наземных технических служб	0,06÷0,12;
для работников метеослужб	0,50÷0,06;
для невыясненных случаев	0,12÷0,05.

Характеристики P_T , P_S в выражении (6) для определения вероятностей возникновения техногенных катастроф имеют свои особенности. Они в значительной степени зависят от составляющей P_N , оцениваемой по выражениям (7)÷(8). В частности, одна из основных причин техногенных катастроф P_T кроется в наличии исходной технологической дефектности в несущих элементах объектов техносферы (стадия $j=2$) и накоплении эксплуатационных повреждений (стадия $j=3$). Характеристика P_S становится значимой, когда внешние воздействия (коррозионные, тепловые, механические, аэрогидродинамические, сейсмические) ускоряют накопление указанных повреждений, обусловленных самими объектами техносферы, операторами и персоналом.

По аналогии с (1.9) можно записать

$$P_T = \sum K_{ij}^T \cdot P_T. \quad (1.10)$$

Для объектов гражданского строительства для стадии изготовления ($i=2$) можно принять $k_{ii}^T=0,45$, а для стадии эксплуатации ($j=3$) $k_{ij}^N=0,55$. Для объектов авиационной техники, подвергаемых тщательному контролю при изготовлении указанные коэффициенты можно принять равными 0,25 и 0,75 соответственно.

Таким образом при анализе планетарных и глобальных рисков можно считать, что объектами такого анализа оказываются как сама планета Земля в целом, так и ее крупные регионы, включающие группы сопредельных государств. При таком анализе в качестве исходного методического подхода можно использовать деление интегральной сферы жизнедеятельности (ноосферы) три основных компонента: техносферу (техногенный фактор) T , окружающую природную среду (природный фактор) S и население (человеческий фактор) N . Указанные факторы T , S , N в общем случае формирования и реализации рисков выступают в двух противоположных ролях – они являются источниками и причинами катастроф всех уровней i , в заданные моменты времени t и пространства x , y , z , с одной стороны, и жертвами опасных процессов и явлений, с другой. Это позволяет записать риски $R(t)$, ущербы $U(t)$ и вероятности $P(t)$ для компонентов всей сферы жизнедеятельности:

$$R(t) = F_R \{U(T, S, N), P(T, S, N), t\} = R\{T, S, N\}. \quad (1.11)$$

Анализ глобальных, национальных, региональных, местных, объектовых и локальных аварий и катастроф выполняется в рамках анализа национальных стратегических рисков. Вопросы анализа планетарных и глобальных рисков представляются наиболее сложными и становятся самостоятельным предметом фундаментальных национальных исследований, разработок Концепций национальной безопасности – США, России и других стран, решений и рекомендаций мирового сообщества – конференции ООН в Рио-де-Жанейро (1991 г.), Йоганнесбург (2002 г.), Кобе (2005 г.)

Как отмечалось выше, по степени потенциальной опасности, приводящей к планетарным, глобальным и национальным катастрофам можно выделить объекты ядерной, химической, металлургической и горнодобывающей промышленности, уникальные инженерные сооружения (плотины, эстакады, нефтегазохранилища), транспортные системы (аэрокосмические, надводные и подводные, наземные), перевозящие опасные грузы и большие массы людей, магистральные газо-, нефте-, и продуктопроводы. Сюда же относятся опасные объекты оборонного комплекса - ракетно-космические и самолетные системы с ядерными и обычными зарядами, атомные подводные лодки и надводные суда, крупные склады обычных и химических вооружений.

Аварии и катастрофы на указанных объектах могут инициироваться опасными природными явлениями - землетрясениями, ураганами, штормами. Сами техногенные аварии и катастрофы при этом могут сопровождаться радиационными и химическими повреждениями и заражениями, взрывами, пожарами, обрушениями. Типы и параметры поражающих факторов при этом могут изменяться в весьма широких пределах.

В качестве исходных имитационных моделей для анализа планетарных и глобальных рисков можно принять модели космического аппарата космического объекта ракетно-космических систем и уникальных энергетических установок с атомными реакторами.

При анализе безопасности таких сложных технических систем были сформулированы пять состояний объектов в штатных и аварийных режимах: два для нормальных и близких к нормальным состояниям и три основных сценария и вида аварийных ситуаций: проектные, запроектные и гипотетические (табл. 1.3). В его основе лежат такие параметры, как локальные напряжения σ и деформации ϵ , числа циклов N , температура t и время τ эксплуатации. В зависимости от типа потенциально опасных объектов имеет место чрезвычайно широкая вариация этих параметров ($10^0 < N < 10^{12}$, $270^\circ\text{C} < t < 10000^\circ\text{C}$, $100 \text{ с} < \tau < 80$ лет), это приводит к тому, что сценарии и проектные аварийные ситуации, как правило, охватывают области исследования накопления повреждений классиче-

скими теориями сопротивления материалов, теории упругости, пластичности и ползучести. Расчетные и экспериментально определяемые напряжения и деформации при этом остаются на уровне предела упругости.

Таблица 1.3

Типы аварийных ситуаций и степень защищенности объектов техносферы

№	Аварийные ситуации	Защищенность	Риски
1.	Нормальные условия эксплуатации	Повышенная	Управляемые
2.	Отклонения от нормальных условий	Достаточная	Регулируемые
3.	Проектные аварии	Частичная	Анализируемые
4.	Запроектные аварии	Недостаточная	Повышенные
5.	Гипотетические аварии	Низкая	Высокие

При переходе к запроектным авариям анализируются нелинейные закономерности деформирования и разрушения — при этом напряжения становятся менее информативными параметрами, чем деформации. Повреждения от вибраций и усталости переходят в повреждения от малоциклового усталости. Еще большее возрастание напряжений и деформаций обуславливает переход к гипотетическим авариям и катастрофам. При этом теоретической основой анализа таких ситуаций является статическая и динамическая нелинейная механика разрушения, деградации и катастроф, как модельных объектов, так и планетарных систем.

Планетарные и глобальные риски создаются преимущественно при сценариях перехода проектных аварийных ситуаций в запроектные и гипотетические. Бурное развитие научно-технического прогресса в гражданском и оборонном комплексах во многих странах мира, особенно в период и после второй мировой войны, привело к существенному разрыву между экспоненциально возрастающими угрозами в природно-техногенной сфере и способностью отдельных стран и мирового сообщества в целом противостоять этим угрозам.

Степень защищенности человека, государства, человечества, а также среды обитания и жизнедеятельности от все нарастающих опасностей техногенных катастроф, несмотря на предпринимаемые усилия во всем мире, пока не повышается. В силу целого ряда важнейших политических, социальных, экономических, демографических факторов последнего десятилетия угрозы планетарного и глобального характера в природной, техногенной и социальной сферах в ближайшей перспективе могут стать одними из доминирующих. Техногенные и природные катастрофы в свою очередь способны создавать и усиливать угрозы

в указанных выше социально-политической, экономической, демографической и военно-стратегической сферах.

Планетарные и глобальные катастрофы могут характеризоваться исключительно высокими градиентами усиления факторов, поражающих население, техносферу и окружающую среду в моменты их бифуркационного возникновения и развития. Времена прямого воздействия поражающих факторов (ядерные взрывы, столкновения с астероидами, цунами) могут измеряться секундами и часами, а их негативные последствия могут проявляться сотни и тысячи лет (ядерная зима, радиационное заражение, эпидемии). Такие же катастрофы могут реализовать ядерные и ракетно-космические технологии и модели позволяют провести построение как сценариев планетарных и глобальных катастроф, так и серии барьеров на путях их развития, получившей название глубокоэшелонированной защиты.

1.3. Пути преодоления противоречий между человеком и природой *(К. Н. Трубецкой, Ю. П. Галченко, 2005)*

Состояние природной среды определяется совместным действием шести энергетических факторов: солнечной энергии, сил гравитации, тектонических сил, химической энергии (в природе это в основном окислительно-восстановительные процессы), биогенной энергии (фото- и хемосинтез) и энергии мировой индустрии. Первые пять из них, развиваясь сопряженно по геологической шкале времени, сформировали за 4 млрд. лет природную среду и, наконец, самого человека. Появившийся вместе с ним новый фактор - энергия мировой индустрии - утраивает свою мощь в среднем через каждые 15 лет. Большое место в развитии этого антропогенного фактора занимает минерально-сырьевой комплекс. Масштабы и темпы развития индустрии добычи и переработки полезных ископаемых сегодня общеизвестны. Вызванный этим развитием технологический прессинг на природные экосистемы приводит их к необратимому разрушению, которое по своим масштабам быстро обретает глобальный характер. Тем не менее, получение полезных ископаемых из недр Земли сегодня и в обозримом будущем - безальтернативная основа самого существования человеческой цивилизации. Поэтому в рамках поиска глобальной концепции совместного развития общества и природы исключительно важное место занимает исследование проблемы экологической безопасности освоения минеральных ресурсов.

Современное состояние проблемы взаимоотношений техно- и биосферы можно охарактеризовать как постепенный и очень трудный переход от восприятия природы в качестве безграничного ресурса потребления к пониманию необходимости ее сохранения как важнейшей гарантии сохранения человеческой

цивилизации. Поэтому прекращение или резкое снижение темпов техногенного разрушения природных экосистем следует включить в число основных целей технологического развития, а определение путей достижения этой цели становится важнейшей фундаментальной научной проблемой.

Эта смена модели мышления отразилась в концепции "Sustainable development", которая представляет собой сложный конгломерат биологических, экологических, политических, экономических, социальных, технико-технологических и моральных проблем и вопросов, тесно детерминированных друг с другом на уровне конечной цели - сохранение естественной биоты Земли как гарантии выживания будущих поколений людей.

Все живое на Земле существует за счет энергии Солнца, неорганического вещества абиоты и прежде всего - воды. основополагающим элементом этой триады является энергия Солнца. Все огромное разнообразие живой материи определяется борьбой за наиболее эффективное получение этой энергии, то есть место каждого вида в общей иерархии живой материи определяется эволюционно выработанным способом получения энергии Солнца.

Эволюционное преобразование *Homo habilis* в *Homo sapiens*, с точки зрения их взаимоотношений с природой, ознаменовало коренную смену способа получения энергии Солнца. Человек стал получать ее не за счет потребления части биомассы, произведенной на других уровнях пищевой пирамиды в рамках замкнутого цикла, а за счет целенаправленного разрушения равновесных биологических систем первичной биоты и замены их на искусственно-равновесные экосистемы хозяйственного назначения, в которых локальное по месту и времени равновесие поддерживается путем приложения труда человека.

Именно на этом уровне исследования проблемы лежит самое глобальное противоречие системы «человек - естественная биота Земли», заключающееся в том, что человек, осознавая себя частью природы и стремясь к ее сохранению в интересах будущих поколений, может существовать как биологический вид только за счет ее разрушения. В основе подхода к преодолению данного противоречия должен лежать принцип создания равных возможностей для развития техносферы и биосферы, который определен как стратегия коэволюции двух антагонистических систем.

Реализация этого принципа предусматривает одновременное развитие трех фундаментальных научных направлений:

- изучение процессов техногенного нарушения абиоты экосистем с целью определения технологических путей устранения или снижения характерных для каждого типа производства техногенных факторов;
- изучение реакции биоты экосистем на действие техногенных факторов с целью определения биологически обоснованного ограничения уровня каждого из них;

- изучение законов формирования и функционирования пограничных зон на стыке коэволюционирующих антагонистических систем техно- и биосферы.

Другое противоречие заключается в том, что ресурсы и энергию, затрачиваемые на охрану природы, человек может получать только путем разрушения ее важнейшей части - литосферы. Выход из положения здесь видится в придании техногенному разрушению биоты экосистем биологически обратимого характера, что позволит локализовать эти разрушения во времени за счет разного его масштаба при развитии антропогенных (техногенных) и биогенных процессов.

Следующее противоречие, заложенное сегодня в систему взаимоотношений человека и природы, можно определить как противоречие между декларированными и фактическими целями природоохранной деятельности. Вся существующая система управления взаимодействием техно-и биосферы базируется на известном со времен Древней Греции принципе логических построений с подменной цели.

Первый уровень подмены заключается в том, что, избрав в качестве цели сохранение оптимального состояния природы, мы применяем экономические критерии и показатели, не связанные по своей сути с биологическими особенностями объекта защиты, и добиваемся фактически оптимального состояния экономики.

Второй уровень подмены цели возникает, когда степень опасности техногенного воздействия на биоту экосистем во всей ее сложности оценивают по нормативам, характеризующим опасность этих воздействий только для здоровья человека. То есть декларированная охрана природы фактически сводится к охране человека в ней.

Для преодоления этого противоречия надо создать систему регулирования взаимодействия техно-(антропо-) и биосферы по показателям и критериям, отражающим свойства и реакцию объекта защиты - естественной биоты Земли. Проблема эта - комплексная и содержит в себе две компоненты:

- создание на основе познания законов развития живой природы системы показателей, регламентирующих величину внешних нагрузок по условиям толерантности биосистем;
- создание на основе познания законов развития техносферы технологий, позволяющих управлять уровнем внешних воздействий в биологически обоснованных диапазонах.

Использование антропоцентрических критериев регулирования взаимодействия техно- и биосферы порождает еще одно внутреннее противоречие между разнообразием объектов защиты (множеством типов экосистем) и единообразием критериев, регламентирующих для них каждый вид техногенного воздействия, без преодоления которого любые природоохранные мероприятия всегда будут биологически неэффективны.

Совместное действие всех этих противоречий в сочетании с очень слабо выраженной экономической заинтересованностью производства в сохранении естественной биоты Земли создает сегодня парадоксальную ситуацию, когда деградация природы происходит на фоне быстрого роста затрат на ее охрану. Постепенная экологизация общественного мышления содействовала пониманию того, что хотя природопользование и является основой существования человека, но при его осуществлении необходимо ориентироваться на экологический (биологический), а не на технократический императив. Точного понимания этой концепции пока нет. Однако несомненно, что, если экологический императив не будет сформулирован конкретно - как система определенных ограничений, методов их определения и способов достижения, взаимосвязанных через единство конечной цели, - он останется лишь общей и малопригодной для практики декларацией добрых намерений.

Эволюционно обусловленный способ получения человеком энергии Солнца и формирования среды своего обитания через разрушение естественной биоты Земли приводят к тому, что само развитие человечества на нашей планете предопределяет существование на ее поверхности трех территориальных комплексов. Один представлен естественной биотой Земли, второй - искусственно-равновесными системами хозяйственного назначения, третий - урбанистической средой обитания человека и сферой промышленного производства. Все эти комплексы развиваются по своим внутренним законам, различаются принципами взаимодействия с окружающей средой и содержанием понятия экологической безопасности, а следовательно, предназначением и структурой идеи экологического императива.

Наиболее сложная проблема - взаимодействие объектов промышленной инфраструктуры с естественной биотой Земли - возникает при освоении земных недр, так как вследствие геологической предопределенности расположения месторождений, добыча минеральных ресурсов всегда связана с неизбежным антропогенным вторжением в природно-равновесные экосистемы. Поэтому, проецируя идеи создания равных возможностей для развития двух несовместимых систем путем согласования уровня техногенных нагрузок на биоту с порогом ее устойчивости можно сформулировать фундаментальную проблему геоэкологии как определение принципов и условий коэволюции природных и горнотехнических геосистем на основе изучения законов их развития и взаимодействия.

Все критерии, регулирующие взаимодействие техногенных и природных объектов, а также регламентирующие характер и величину техногенных факторов, строятся на основе законов развития биологических систем, а все возможности выполнения этих ограничений связаны исключительно с изменением применяемых горных технологий.

Рассматривая механизм техногенных изменений природных систем, по характеру участия в общем процессе можно выделить три экологических блока:

- источники воздействий и загрязнений - элементы техносферы, в которых

воспроизводятся техногенные воздействия и вещества, изменяющие условия существования природной среды;

- транзитные среды, в которых происходит прием и транспортировка техногенных веществ и распространение изменений;
- депонирующие среды, свойства которых изменяются в результате техногенных воздействий или накопления и преобразования техногенных веществ.

В общей системе знаний, необходимых для реализации основополагающих экологических принципов концепции устойчивого развития, целесообразно выделить три основных подсистемы, существенно различающихся как по объектам, так и по методам исследования, но ориентированных на достижение единой конечной цели. Принятый порядок описания этих подсистем определяется анализом прямых и обратных причинно-следственных связей между ними.

Первая подсистема - геотехнология - рассматривает экологический блок источников воздействий и загрязнений, связанных с освоением недр. В круг основных научных задач здесь входят:

- анализ применяемых горных технологий и их систематизация по структуре, величине и характеру внешних воздействий;
- изучение физико-химических и других механизмов их возникновения при использовании тех или иных технологий горного производства;
- систематизация техногенных факторов, влияющих на окружающую среду по возможностям и путям управления их величиной, вплоть до полного устранения;
- разработка общих принципов создания и вариантов типовых технологий с заданной степенью управляемости по величине и структуре внешних техногенных воздействий;
- разработка критериев оценки интегрального уровня изменения окружающей среды при работе горных предприятий.

Вторая подсистема знаний - геоэкология - охватывает круг научных задач по изучению процессов, протекающих в транзитных фациях абиоты природных экосистем и законов распределения в них поллютантов и воздействий, свойственных горнодобывающим предприятиям. Конечной целью является определение внешних границ участков биоты, подверженных тем или иным техногенным изменениям, а также характер этих изменений и их распространение во времени и пространстве. Методической основой этих исследований является сбор и анализ фактографической информации, широко применяемый сегодня при реализации санитарно-гигиенического принципа экологического нормирования.

В отличие от большинства других отраслей промышленности, воздействие горного производства на окружающую среду носит объемный характер. Происходит изменение литосферы, гидросферы, атмосферы, а также поверхности Земли, включая естественную биоту. Все формы техногенного влияния на окружающую среду либо возникают при создании условий для антропогенного вторжения в литосферу с целью получения минеральных ресурсов, либо явля-

ются внешним выражением его последствий. Воздействия реальных добывающих предприятий на естественную биоту всегда многокомпонентны. При этом далеко не всегда можно объективно выстроить иерархию этих воздействий по степени их опасности. Создавать же экологические нормативы отдельно для каждого токсиканта возможно только в лабораторных условиях, а учитывать совместное воздействие практически реально только для трех-четырех поллютантов или физических факторов. Следовательно, при реализации наблюдений за экосистемами, воспринимающими комплексные техногенные нагрузки, остро ощущается необходимость перевода информации о разнохарактерных воздействиях в интегральный показатель. Это является одной из важнейших научных задач исследования условий коэволюции природных и техногенных геосистем.

Для сохранения биоты при освоении недр следует определить конкретные природные объекты (типы экосистем), которые оказываются в зоне влияния горного производства, а также реальный уровень техногенной нагрузки на эти экосистемы, вызванной геотехнологией, применяемой для разработки данного месторождения. Решение этой научной проблемы, безусловно, должно опираться на огромную теоретическую, методическую и информационную базу, созданную в ходе многолетнего развития и применения принятой сегодня концепции санитарно-гигиенического нормирования техногенных воздействий на природную среду.

Третья подсистема знаний для практического решения вопросов экологии при освоении недр - это изучение техногенных трансформаций в той части биоты, которая находится в пределах зон воздействия добывающих предприятий, и нахождение биологически обоснованных предельных нагрузок на нее по отношению к тем техногенным факторам, которые свойственны применяемой геотехнологии.

Необходимо создать единообразную систему конкретных показателей, регламентирующих техногенное воздействие на биологические системы по условиям их сохранения, а также методики определения этих показателей. Биологически обоснованные критерии, применяемые для расчета параметров горных технологий, должны удовлетворять следующими требованиям:

- комплексность (способность интегрально отражать техногенные изменения биологической системы);
- объективность (возможность определения на основе измерений естественных параметров биоты);
- конкретность (наличие численной величины и отсутствие качественных и эмоциональных оценок);
- целенаправленность (использование критерия должно обеспечивать сохранение биоты);
- чувствительность (величина показателя изменяется пропорционально степени техногенного возмущения биоты).



Рис. 1.7. Принципиальная схема взаимодействия составных частей природоохранной концепции развития геотехнологии (экологического императива)

Методики определения любого регламентирующего критерия должны быть построены на законах развития биологических систем, но давать показатели, пригодные для применения в горнотехнических расчетах.

Решение технологических проблем, связанных с обеспечением экологической безопасности производства путем соблюдения биологически обоснованных ограничений воздействия, потребует изменения системы информации об окружающей среде. Она должна принимать во внимание характеристики окружающей среды в технических расчетах, отличаться предельной точностью и адекватно описывать свойства биологического элемента, на который распространяется реальное техногенное воздействие. Это вступает в противоречие со сложностью строения окружающей среды. Чтобы преодолеть эти противоречия,

необходимо разработать научно обоснованные принципы дифференциации окружающей среды на элементы, свойства которых достаточно постоянны и определены.

Время существования предприятия, а, следовательно, и период техногенной нагрузки на природу, обусловлены запасами месторождения. После снятия техногенной нагрузки надо изучить законы развития разрушенных экосистем и сформулировать на этой основе методологические принципы биологических и технических действий в зонах влияния добывающих предприятий. Акцент должен быть сделан не на простое механическое восстановление нарушенных ландшафтов, как это часто бывает при проведении рекультивации, а на комплексное решение проблемы воспроизводства устойчивых биологических структур, соответствующее законам циклической сукцессии с учетом фактора времени.

И, наконец, четвертая подсистема знаний, обеспечивающая возможность достижения экологического императива в ходе освоения недр при работе промышленных (в том числе и добывающих) предприятий, включает в себя все аспекты проблемы разработки методов ограничения техногенного воздействия на естественную биоту. Эта проблема, в свою очередь, распадается на две части: создание технологий с заданными свойствами и системы мотивации их применения.

Большие перспективы при этом имеет идея трансформации в техносферу принципов, обеспечивавших экологическую чистоту функционирования биологических систем, и разработки на их основе экотехнологий горного производства. Появление биологически обоснованных ограничений уровня техногенного воздействия придаст целенаправленность и конкретность геотехническим исследованиям.

В условиях рыночной экономики любые изменения технологии в интересах безопасности человека или окружающей среды снижают эффективность производства. Необходимым условием для реализации этих технических возможностей является декларированная в виде конкретных законодательных, экономических и других актов заинтересованность общества в сохранении естественной биоты Земли. Создание методических основ построения законодательства, стимулирующего применение экологически безопасных технологий, - неотъемлемый компонент, входящий в понятие экологического императива (рис. 1.7). А он представляет собой сложную совокупность технологических, биологических, законодательных и некоторых других принципов и решений. Только совместное их применение может обеспечить сохранение условий функционирования и эволюции естественной биоты Земли при развитии технократической цивилизации.

ГЛАВА 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ СВОЙСТВА

2.1. Элементы теории систем

Система Σ – конечная совокупность (E) элементов и некоторого регулирующего устройства (R), которое устанавливает связи между элементами (e_i), управляет этими связями, создавая неделимую единицу функционирования:

$$\Sigma = \{E, R\}, \quad (2.1)$$

где $\{e_i\}_{i=1}^N = E$ – множество элементов.

Функционирование F системы Σ – это процесс последовательный во времени T по переработке входной I_{вх} в выходную I_{вых} информации (рис. 2.1).

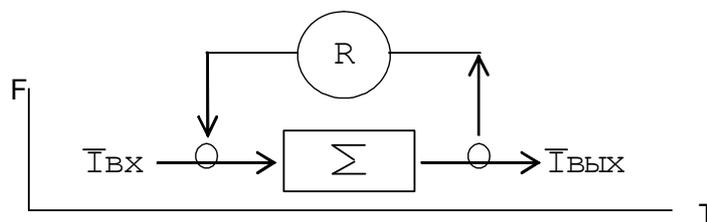


Рис. 2.1. Процесс функционирования системы

Система Σ работает под воздействием управляющих сигналов от R во времени T, и определяется на множестве информации I.

Система формально задается как некая упорядоченная последовательность (вектор, картеж) вида:

$$\Sigma = \langle T, X, \Omega, Y, V, H, G, F, Z \rangle, \quad (2.2)$$

где

$T = \{(t_i, t_{i+1})\}_{i=1}^N$ – ось времени;

$X = \{x_j\}_{j=1}^N$ – множество входной информации;

$\Omega = \{\omega_i\}_{i=1}^N, \omega_i \in \Omega$

ω_i – оператор ввода, множество Ω – входных воздействий;

$Y = \{y_i\}_{i=1}^M$ – множество результатов;

$V = \{\gamma_j\}_{j=1}^M$ – множество выходных воздействий.

Процесс преобразования входной информации X в выходную информацию Y на оси T определяется тремя функциональными факторами:

G – алгоритм, функция выхода;

H – функция поведения системы, при использовании ресурсов системы внутренних состояний), функция перехода;

F – функция управления, изменяющая как, G так и H;

Z – множество внутренних состояний или ресурсов системы и $Z = \{Z_j\}$ и

$$\begin{aligned}
G &: (XxZ) \Rightarrow Y \\
H &: (XxZ) \Rightarrow Z \\
F &: (XxZxT) \Rightarrow (GxH). \\
\Omega &: T \xrightarrow{\omega} X \\
V &: T \xrightarrow{\gamma} Y
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

Эти **параметры определяют** следующие свойства системы Σ :

- 1) система и ее поведение определяется более чем одним фактором, т.е. система –энарная функция;
- 2) наличие фактора времени Т говорит о том, что системы могут быть непрерывные, дискретные, динамические и статические;
- 3) наличие факторов Х и Ω , У и V говорит о том, что система может быть реализована и связана с внешней средой. У системы должно быть 0 или более входов и 1 или более выходов;
- 4) фактор G говорит о том, что процесс преобразования X в Y может быть формализован по виду входной и выходной информации даже, если не известна внутренняя структура системы;
- 5) наличие H,Z – система имеет свой конкретный способ поведения, который влияет на G, а так же H и Z влияет на получение конкретного результата Y;
- 6) наличие F – система может быть самоуправляемой, самоуправляющей, саморегулируемой или саморегулирующей;
- 7) наличие множества E-элементов и связей определяют тот факт, что

Простые системы –системы, описываемые простыми (линейными) функциями поведения. Имеют линейную связь и один уровень управления. Простые системы являются одноуровневыми.

Сложные системы –системы, состоящие из большего числа элементов, имеющие большее число связей и выполняющие некую сложную функцию; связи создают т.н. иерархическую (многоуровневую) структуру системы.

Свойства сложных систем:

1. **Мощность системы** – определяется количеством элементов в системе, количеством связей между ними. Мощность порождает структурную сложность системы.
2. **Многофакторность.** Многофакторность и сложность порождают проблему надежности системы.
3. **Эмерджентность** – свойство системы не есть механическая сумма свойств ее элементов.
4. **Гомоморфность.** Система может быть представлена в виде схемы более чем одним способом (т е иметь несколько аналогичных схем)

Определение основных характеристик системы

Сложность системы определяется как структурная и функциональная сложность.

Функциональная сложность C_F – количество шагов (счетных и логических), требуемых для реализации конкретно заданной функции F :

$$C_F = (H * L)K, \quad (2.4)$$

где L – логическая глубина вычислений (длина самой длинной цепочки вычислений, самого длинного пути работы); H – степень параллелизма вычислений (работ); K – степень сложности реализации системы, если система еще не реализована $K=1$;

Структурная сложность C_Σ – некоторая метрическая величина, определяющая количество элементов и количество связей системы

$$C_\Sigma = \frac{m}{n(n-1)}, \quad (2.5)$$

где m – число реализованных связей в системе между элементами; n – общее число элементов в системе.

Если система реализована, то структурная сложность рассчитывается как

$$C^* = (1 + \xi * C_\Sigma) * C_e, \quad (2.6)$$

где C_e – сложность реализации элементов в системе; ξ – относительная величина сложности реализации связей и элементов в системе, т.е.

Сложность C – это некая метрическая величина, ставящаяся в соответствие структурно-функциональному составу системы.

Надежность R – напрямую зависит от сложности. Это некая метрическая величина, которая определяет способность системы сохранять заданные свойства поведения при наличии внешних и внутренних воздействий, т.е.

- а) быть устойчивой в смысле функционирования,
- б) быть помехозащищенной в смысле сохранении элементов и структуры от механических воздействий:

$$R = f(T^H, \bar{T}, P(t_i, t_{i+1}), \Delta(t_i, t_{i+1})), \quad (2.7)$$

где

- 1) T^H – время нормальной работы системы (время от начала запуска системы до того момента, когда из-за накопившегося числа явных и неявных отказов система «плохо» работает)

2) \bar{T} – среднее время безотказной работы, (вычисляется по наблюдению за работой системы).

3) $P(t_i, t_{i+1})$ или $P(\Delta t)$ вероятность безотказной работы в интервале $\Delta t = (t_i, t_{i+1})$;

4) $\Delta(t_i, t_{i+1})$ – средний поток отказов на интервале (t_i, t_{i+1}) .

Эффективность \mathcal{E} – метрическая величина, определяющая способность системы хорошо выполнять заданную работу. Эффективность вычисляется через функционал качества Φ и функцию управления:

$$\Phi(X, Z_0, \Delta t, \omega) = y \approx \mathcal{E}, \quad (2.8)$$

где Φ – функция управления; \mathcal{E} – эффективность; X – начальные данные (ввод); Y – конечные данные (вывод); Z_0 – начальное состояние (ресурсы); Δt – интервал работы (времени); ω – входные воздействия (операторы ввода).

Качество управления системой вычисляется через функцию управления J

$$J(X, Z_0, Z_i, g, \omega) = \{\Delta t_i\}. \quad (2.9)$$

Функция управления J – это некоторая метрическая величина, определяющая минимально допустимый интервал времени Δt_{\min} , необходимый для завершения работы системы по получению ожидаемого результата.

На практике часто для определения эффективности системы используют дополнительные характеристики системы:

1. Пропускная способность Π (если $\Pi \rightarrow 1$, то имеет место высокая пропускная способность $\min \Delta t$);

2. Универсальность U (если $U \rightarrow 1$, то имеет место высокая универсальность и низкая надежность);

3. Степень иерархичности J (определяется по каждому виду иерархии: управление, информация, время, функция, страты).

Управление системами

Управление – процесс переработки входных X сигналов в выходные Y под воздействием и контролем управляющего объекта R . Процесс управления включает пять основных функций:

f1 – планирование,

f2 – учет,

f3 – контроль,

f4 – анализ,

f5 – регулирование,

f2-учет – фиксирует состояние системы в каждый t_i -ый момент времени,
 f3-контроль – определять Δ – отклонения состояний от плановых значений.

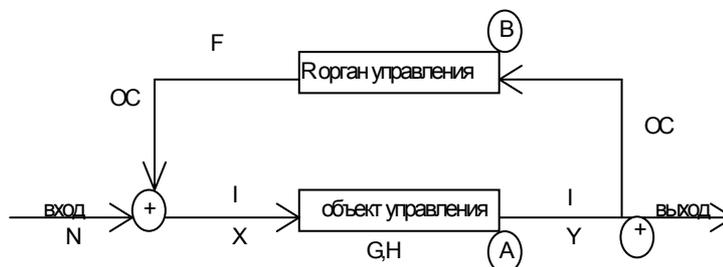


Рис.2.2. Общий вид системы Σ с органом R-управления

$$\Sigma = \{E; R\};$$

I, X, Y – связь по информации, X – входная информация, Y-выход;

N – внешние ресурсы;

F – воздействующий сигнал (связь по управлению);

G – алгоритм преобразования ресурсов в блага общества;

H – способ использования внутренних ресурсов системы;

ОС – обратная связь;

\oplus – логический оператор (распознаватель)

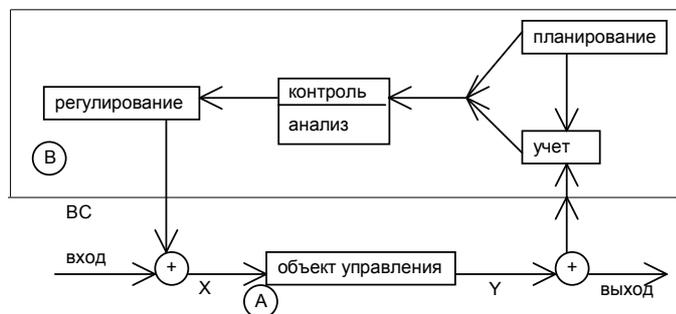


Рис. 2.3. Принципиальная схема управления

Посредством контроля учетная информация сравнивается с запланированной, результаты анализируются. По результатам анализа f_4 принимается решение f_5 о том, что делать с G, H, Z, в соответствии с этим выдается сигнал управления F.

Каждая система связана с внешней средой входными (x) и выходными (y) сигналами. Т.о. система состоит из управляющего и управляемого объектов.

Управляемый объект А – элемент, реализующий счетные (числовые) или логические функции по преобразованию информации, и на который воздействует регулирующее устройство R с помощью элементов управления.

Управляющий В орган (R) – воздействует на управляемый А объект, но сам воздействия не испытывает.

В зависимости от количества элементов в системе и характеру связей системы подразделяются на:

1. Одноуровневые,
2. Многоуровневые (иерархические)

Одноуровневые системы (линейные) – системы, которые определены одной целевой функцией и имеют одну функцию управления, а переработанная информация передается от элемента к элементу по схеме:

$$F \rightarrow (S_1, S_2, \dots, S_k, \dots) \phi = \Sigma, \quad (2.10)$$

где

ϕ – целевая функция Σ – системы

Многоуровневая система (иерархическая) – это сложная система, структура которой такова, что управление передается от вышестоящего уровня к нижестоящему, а обрабатываемая информация от нижестоящих к вышестоящим уровням.

Существует 5 типов иерархий:

1. по управлению (каждый последующий уровень подчинен управленческой информации),
2. по информации (каждый уровень зависит от информации предыдущего),
3. по функциям (каждый уровень – это своя функция),
4. по времени (каждый уровень привязан по его активизации к следующему интервалу времени, когда работает только один уровень, а другие не работают),
5. по деятельности (каждый уровень определяется видом деятельности, работы).

Преимущества иерархической системы:

1. высокая надежность (дополнительные уровни-дублиеры),
2. высокая пропускная способность,
3. универсальность,
4. высокая эффективность.

Общая схема классификации сложных систем представлена на рис. 2.4.

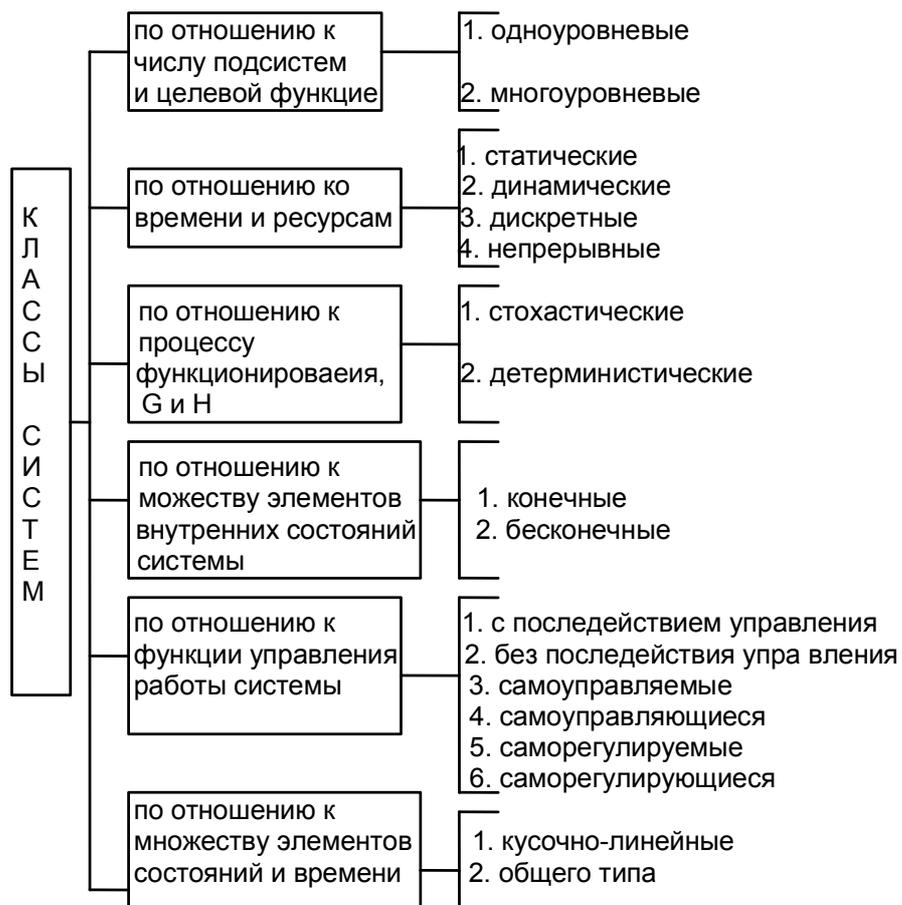


Рис. 2.4. Схема классификаций систем

Основные черты сложной системы

1. **Целостность и членимость**. Система – целостная совокупность элементов, т.е. система целостное образование, в ее составе могут быть выделены целостные объекты (элементы). Для системы первичным является признак целостности, т.е. она рассматривается как единое целое, состоящее из взаимодействующих частей, часто разнокачественных, но одновременно совместимых.

2. **Связность**. Наличие существенных устойчивых связей (отношений) между элементами или (и) их свойствами, превосходящих по мощности (силе) связи этих элементов с элементами, не входящими в данную систему. Является атрибутом системы. С системных позиций значение имеют не любые, а лишь существенные связи, которые определяют интегративные свойства системы. Это свойство отличает систему от простого конгломерата.

Связь можно определить как физический канал, по которому обеспечивается обмен между элементами системы и системы с окружающей средой – веществом, энергией и информацией. Основная особенность связи - преобразование некоторой величины или пространства без изменения их физической природы. Основные характеристики связи: физическое наполнение (вещественные, энергетические, информационные, смешанные), направленность (прямые, обратные, нейтральные), мощность (система существует как целостное образование тогда, когда мощность (сила) существенных связей между элементами системы на интервале времени, не равном нулю, больше, чем мощность (сила) связи этих элементов с окружающей средой) и роль в системе (связана с характером ее влияния на ход процессов; различают связи: соединительные, ограничивающие, усиливающие (ослабляющие), селективирующие, запаздывающие (опережающие, мгновенные), преобразующие, положительные и отрицательные обратные связи, согласующие, координирующие и т.п.

3. **Организация**. Свойство характеризуется наличием определенной организации, что проявляется в снижении энтропии (степени неопределенности) системы $H(S)$ по сравнению с энтропией системоформирующих факторов $H(F)$, определяющих возможность создания системы:

$$H(S) < H(F) \leq k \cdot \ln(n \cdot a \cdot \gamma \cdot b \cdot l \cdot t), \quad (2.11)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг} / \text{к}$ – постоянная Больцмана, системообразующие факторы: n - число элементов системы, a - число системозначных свойств элемента, γ - число существенных связей, которыми может обладать элемент, b - число системозначных свойств связей, l - число квантов пространства, t - число квантов времени.

Возникновение организации в системе – формирование существенных связей элементов, упорядоченное распределение связей и элементов во времени и пространстве. При формировании связей складывается определенная структура системы, свойства элементов трансформируются в функции (действие, поведение), связанные с интегративными качествами.

4. Произвольная природа элементов.
5. Отсутствие математического описания.
6. Стохастичность поведения.
7. Нестационарность (старение, износ, ...).
8. Невоспроизводимость экспериментов, т.е. различные реакции системы на одно и то же воздействие в различные моменты времени.
9. Эргоичность (наличие человека с его непредсказуемым поведением).
10. «Нетерпимость к управлению» - сложные системы существуют и функционируют независимо от субъекта и его потребностей. Например, технологический процесс существует для производства продукции, и не для управления им.

Выводы

1. Система не сводится к простой совокупности элементов.
2. Расчлняя систему на отдельные части, изучая каждую из них в отдельности, нельзя познать все свойства системы в целом.
3. Объект, обладающий всеми десятью свойствами, будет являться системой.
4. Структура системы – устойчивость, упорядоченность в пространстве и времени ее элементов и связей.

2.2. Законы развития технических систем

Определение технической системы

Техническая система - совокупность упорядоченно взаимодействующих элементов, обладающая свойствами, не сводящимися к свойствам отдельных элементов, и предназначенная для выполнения определенных полезных технологических функций (Ю. П. Саламатов, 1991-1996).

Техническая система (ТС) состоит из элементов (составных частей, различающихся свойствами, проявляющимися при взаимодействии) объединенных связями (линиями передачи единиц или потоков чего либо) и вступающих в определенные отношения (условия и способы реализации свойств элементов) между собой и с внешней средой, чтобы осуществить процесс (последовательность действий для изменения или поддержания состояния) и выполнить функцию ТС (цель, назначение, роль). ТС имеет структуру (строение, устройство, взаиморасположение элементов и связей, задающее устойчивость и воспроизводимость функции ТС). – (Википедия)

Смысл системного подхода при исследовании процессов развития в технике заключается в рассмотрении любого технического объекта как системы взаимосвязанных элементов, образующих единое целое. Линия развития представляет собой совокупность нескольких узловых точек - технических систем,

резко отличающихся друг от друга (если их сравнивать только между собой); между узловыми точками лежит множество промежуточных технических решений - технических систем с небольшими изменениями по сравнению с предшествующим шагом развития. Системы как бы "перетекают" одна в другую, медленно эволюционируя, отодвигаясь все дальше от исходной системы, преобразуясь иногда до неузнаваемости. Мелкие изменения накапливаются и становятся причиной крупных качественных преобразований. Чтобы познать эти закономерности, необходимо определить, что такое техническая система, из каких элементов она состоит, как возникают и функционируют связи между частями, каковы последствия от действия внешних и внутренних факторов, и т.д. Несмотря на огромное разнообразие, технические системы обладают рядом общих свойств, признаков и структурных особенностей, что позволяет считать их единой группой объектов.

Основные признаки технических систем:

- системы состоят из частей, элементов, то есть имеют структуру;
- системы созданы для каких-то целей, то есть выполняют полезные функции;
- элементы (части) системы имеют связи друг с другом, соединены определенным образом, организованы в пространстве и времени;
- каждая система в целом обладает каким-то особым качеством, неравным простой сумме свойств составляющих ее элементов, иначе пропадает смысл в создании системы (цельной, функционирующей, организованной).

Техническая система имеет 4 главных (фундаментальных) признака:

- функциональность,
- целостность (структура),
- организация,
- системное качество.

Отсутствие хотя бы одного признака не позволяет считать объект технической системой.

Определение функции

Функционирование это изменение свойств, характеристик и качеств системы в пространстве и времени. Функция - это способность ТС проявлять свое свойство (качество, полезность) при определенных условиях и преобразовывать предмет труда (изделие) в требуемую форму или величину.

Каждая ТС может выполнять несколько функций, из которых только одна рабочая, ради которой она и существует, остальные - вспомогательные, сопутствующие, облегчающие выполнение главной. Определение главной полезной функции (ГПФ) иногда вызывает затруднение. Это объясняется множественностью требований, предъявляемых к данной системе со стороны выше и ниже лежащих систем, а также соседних, внешних и прочих систем. Отсюда кажу-

щаяся бесконечность определений ГПФ (принципиальная неохватность всех свойств и связей).

Определение структуры

Совокупность (целостность) элементов и свойств неотъемлемый признак системы. Соединение элементов в единое целое нужно для получения (образования, синтеза) полезной функции, т.е. для достижения поставленной цели.

Если определение функции (цели) системы в какой-то мере зависит от человека, то структура - наиболее объективный признак системы, она зависит только от вида и материального состава используемых в ТС элементов, а также от общих законов мира, диктующих определенные способы соединения, виды связи и режимы функционирования элементов в структуре. В этом смысле структура это способ взаимного соединения элементов в системе. Составление структуры - это программирование системы, задание поведения ТС с целью получения в результате полезной функции. Требуемая функция и выбранный физический принцип ее осуществления однозначно задают структуру.

Структура - это совокупность элементов и связей между ними, которые определяются физическим принципом осуществления требуемой полезной функции.

Структура остается неизменной в процессе функционирования, то есть при изменении состояния, поведения, совершения операций и любых других действий. **Главное в структуре:** элементы, связи, неизменность во времени.

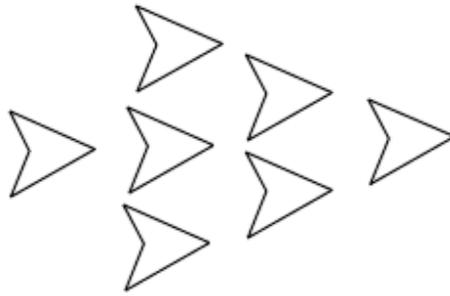
Элемент - относительно целая часть системы, обладающая некоторыми свойствами, исчезающими при отделении от системы. Элемент - минимальная единица системы, способная к выполнению некоторой элементарной функции.

Сумма свойств элемента в системе может быть больше или меньше суммы его свойств вне системы. Система становится все более универсальной при неизменном, а затем и сокращающемся количестве элементов.

Типы структур

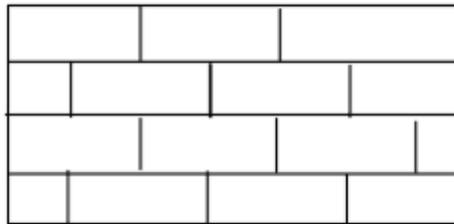
Корпускулярная

Состоит из одинаковых элементов, слабосвязанных между собой; исчезновение части элементов почти не отражается на функции системы. Примеры: эскадра кораблей, песчаный фильтр.



"Кирпичная"

Состоит из одинаковых жестко связанных между собой элементов. Примеры: стена, арка, мост.



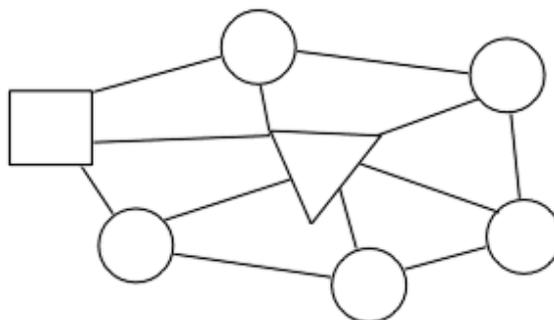
Цепная

Состоит из однотипных шарнирносвязанных элементов. Примеры: гусеница, поезд.



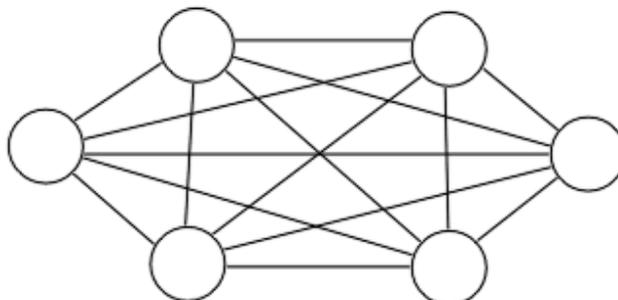
Сетевая

Состоит из разнотипных элементов, связанных между собой непосредственно, или транзитом через другие, или через центральный (узловой) элемент (звездная структура). Примеры: телефонная сеть, телевидение, библиотека, система теплоснабжения.



Многосвязная

Включает множество перекрестных связей в сетевой модели



Иерархическая

Состоит из разнородных элементов, каждый из которых является составным элементом системы более высокого ранга и имеет связи по «горизонтали» (с элементами одного уровня) и по «вертикали» (с элементами разных уровней).
Примеры: станок, автомобиль, винтовка.

1. *Развертывающиеся* - с течением времени при увеличении ГПФ растет количество элементов.

2. *Свертывающиеся* - с течением времени при росте или неизменном значении ГПФ количество элементов уменьшается.

3. *Редуцирующие* - в какой-то момент времени начинается уменьшение количества элементов при одновременном уменьшении ГПФ.

4. *Деградирующие* - уменьшение ГПФ при уменьшении связей, мощности, эффективности.

Законы развития технических систем

Впервые сформулированы Г.С. Альтшуллером в книге «Творчество как точная наука», и в дальнейшем дополнялись последователями.

Изучая эволюцию технических систем во времени, Г. Альтшуллер открыл законы развития технических систем, знание которых помогает инженерам предсказывать пути возможных дальнейших улучшений продуктов:

1. Закон увеличения степени идеальности системы.
2. Закон S-образного развития технических систем.
3. Закон динамизации.
4. Закон полноты частей системы.
5. Закон сквозного прохода энергии.
6. Закон опережающего развития рабочего органа.
7. Закон перехода «моно — би — поли».
8. Закон перехода с макро- на микроуровень.

Самый важный закон рассматривает идеальность системы — одно из базовых понятий в ТРИЗ.

Закон увеличения степени идеальности системы

Техническая система в своём развитии приближается к идеальности. Достигнув идеала, система должна исчезнуть, а её функция продолжать выполняться.

Основные пути приближения к идеалу:

- повышение количества выполняемых функций,
- «свертывание» в рабочий орган,
- переход в надсистему.

При приближении к идеалу техническая система вначале борется с силами природы, затем приспосабливается к ним и, наконец, использует их для своих целей.

Закон увеличения идеальности наиболее эффективно применяется к тому элементу, который непосредственно расположен в зоне возникновения конфликта или сам порождает нежелательные явления. При этом повышение степени идеальности, как правило, осуществляется применением незадействованных ранее ресурсов (веществ, полей), имеющихся в зоне возникновения задачи. Чем дальше от зоны возникновения конфликта будут взяты ресурсы, тем в меньшей степени удастся продвинуться к идеалу.

Закон S-образного развития технических систем

Эволюцию множества систем можно изобразить *логистической кривой*, показывающей, как меняются во времени темпы её развития. Выделяются три характерных этапа:

1. **«детство»**. Идёт, как правило, достаточно долго. В этот момент идёт проектирование системы, её доработка, изготовление опытного образца, подготовка к серийному выпуску.

2. **«расцвет»**. Она бурно совершенствуется, становится всё более мощной и производительной. Машина выпускается серийно, её качество улучшается и спрос на неё растёт.

3. **«старость»**. С какого-то момента улучшать систему становится всё труднее. Мало помогают даже крупные увеличения ассигнований. Несмотря на усилия конструкторов, развитие системы не поспевает за всё возрастающими потребностями человека. Она пробуксовывает, топчется на месте, меняет свои внешние очертания, но остаётся такой, какая есть, со всеми своими недостатками. Все ресурсы окончательно выбраны. Если попытаться в этот момент искусственно увеличивать количественные показатели системы или развивать её габариты, оставляя прежний принцип, то сама система вступает в конфликт с окружающей средой и человеком. Она начинает больше приносить вреда, чем пользы.

В качестве примера рассмотрим паровоз. Вначале был достаточно долгий экспериментальный этап с единичными несовершенными экземплярами, вне-

дрение которых вдобавок сопровождалось сопротивлением общества. Затем последовало бурное развитие термодинамики, совершенствование паровых машин, железных дорог, сервиса — и паровоз получает публичное признание и инвестиции в дальнейшее развитие. Затем, несмотря на активное финансирование, произошёл выход на природные ограничения: предельный тепловой КПД, конфликт с окружающей средой, неспособность увеличивать мощность без увеличения массы — и, как следствие, в области начался технологический застой. И, наконец, произошло вытеснение паровозов более экономичными и мощными тепловозами, и электровозами. Паровой двигатель достиг своего идеала — и исчез. Его функции взяли на себя ДВС и электромоторы — тоже вначале несовершенные, затем бурно развивающиеся и, наконец, упирающиеся в развитии в свои природные пределы. Затем появится другая новая система — и так бесконечно

Закон динамизации

Надёжность, стабильность и постоянство системы в динамичном окружении зависят от её способности изменяться. Развитие, а значит и жизнеспособность системы, определяется главным показателем: **степенью динамизации**, то есть способностью быть подвижной, гибкой, приспособляемой к внешней среде, меняющей не только свою геометрическую форму, но и форму движения своих частей, в первую очередь рабочего органа. Чем выше степень динамизации, тем, в общем случае, шире диапазон условий, при которых система сохраняет свою функцию. Например, чтобы заставить крыло самолёта эффективно работать в существенно разных режимах полёта (взлёт, крейсерский полёт, полёт на предельной скорости, посадка), его динамизируют путём добавления закрылков, предкрылков, интерцепторов, системы изменения стреловидности и проч.

Однако для подсистем закон динамизации может нарушаться — иногда выгоднее искусственно уменьшить степень динамизации подсистемы, тем самым упростив её, а меньшую стойкость/приспособляемость компенсировать созданием стабильной искусственной среды вокруг неё, защищённой от внешних факторов. Но в итоге совокупная система (над-система) всё же получает большую степень динамизации. Например, вместо того, чтобы приспособлять трансмиссию к загрязнению путём её динамизации (самоочистка, самосмазка, перебалансировка), можно поместить её в герметичный кожух, внутри которого создана среда, наиболее благоприятная для движущихся частей (прецизионные подшипники, масляный туман, подогрев и проч.)

Другие примеры:

- В 10—20 раз снижается сопротивление движению плуга, если его лемех вибрирует с определенной частотой в зависимости от свойств грунта.
- Ковш экскаватора, превратившись в роторное колесо, породил новую высокоэффективную систему добычи полезных ископаемых.

- Автомобильное колесо из жёсткого деревянного диска с металлическим ободом стало подвижным, мягким и эластичным.

Закон полноты частей системы

Любая техническая система, самостоятельно выполняющая какую-либо функцию, имеет *четыре основные части* — двигатель, трансмиссию, рабочий орган и средство управления. Если в системе отсутствует какая-либо из этих частей, то её функцию выполняет человек или окружающая среда.

Двигатель — элемент технической системы, являющийся преобразователем энергии, необходимой для выполнения требуемой функции. Источник энергии может находиться либо в системе (например, бензин в баке для двигателя внутреннего сгорания автомобиля), либо в надсистеме (электроэнергия из внешней сети для электродвигателя станка).

Трансмиссия — элемент, передающий энергию от двигателя к рабочему органу с преобразованием её качественных характеристик (параметров).

Рабочий орган — элемент, передающий энергию на обрабатываемый объект, и завершающий выполнение требуемой функции.

Средство управления — элемент, регулирующий поток энергии к частям технической системы и согласующий их работу во времени и пространстве.

Анализируя любую автономно работающую систему, будь то холодильник, часы, телевизор или авторучка, везде можно видеть эти четыре элемента.

Примеры:

- Фрезерный станок. Рабочий орган: фреза. Двигатель: электродвигатель станка. Всё что находится между электродвигателем и фрезой можно считать трансмиссией. Средство управления — человек-оператор, рукоятки и кнопки, или программное управление (станок с программным управлением). В последнем случае программное управление «вытеснило» человека-оператора из системы.

Закон сквозного прохода энергии

Итак, любая работающая система состоит из четырёх основных частей и любая из этих частей является потребителем и преобразователем энергии. Но мало преобразовать, надо ещё без потерь передать эту энергию от двигателя к рабочему органу, а от него — на обрабатываемый объект. Это закон сквозного прохода энергии. Нарушение этого закона ведёт к возникновению противоречий внутри технической системы, что в свою очередь порождает изобретательские задачи.

Главным условием эффективности технической системы с точки зрения энергопроводимости является равенство способностей частей системы по принятию и передаче энергии.

Примеры:

- **Импедансы** передатчика, фидера и антенны должны быть согласованы — в этом случае в системе устанавливается режим бегущей волны, наиболее

эффективный для передачи энергии. Рассогласование ведёт к появлению стоячих волн и диссипации энергии.

Первое правило энергопроводимости системы

Если элементы при взаимодействии друг с другом образуют энергопроводящую систему с **полезной функцией**, то для повышения её работоспособности в местах контактирования должны быть вещества с близкими или одинаковыми уровнями развития.

Второе правило энергопроводимости системы

Если элементы системы при взаимодействии образуют энергопроводящую систему с **вредной функцией**, то для её разрушения в местах контактирования элементов должны быть вещества с различными или противоположными уровнями развития.

Пример:

- При застывании бетон сцепляется с опалубкой, и её трудно потом отделить. Две части хорошо согласовались между собой по уровням развития вещества — оба твёрдые, шероховатые, неподвижные и т. д. Образовалась нормальная энергопроводящая система. Чтобы не допустить её образования, нужно максимальное рассогласование веществ, например: твёрдое — жидкое, шероховатое — скользкое, неподвижное — подвижное. Здесь может быть несколько конструктивных решений — образование прослойки воды, нанесение специальных скользких покрытий, вибрация опалубки и др.

Третье правило энергопроводимости системы

Если элементы при взаимодействии друг с другом образуют энергопроводящую систему с **вредной и полезной функцией**, то в местах контактирования элементов должны быть вещества, уровень развития которых и физико-химические свойства изменяются под воздействием какого-либо управляемого вещества или поля.

Пример:

- Согласно этому правилу выполнено большинство устройств в технике, где требуется соединять и разъединять энергопотоки в системе. Это различные муфты включения в механике, вентили в гидравлике, диоды в электронике и многое другое.

Закон опережающего развития рабочего органа

В технической системе основной элемент — рабочий орган. И чтобы его функция была выполнена нормально, его способности по усвоению и пропуску энергии должны быть не меньше, чем двигатель и трансмиссия. Иначе он или сломается, или станет неэффективным, переводя значительную часть энергии в бесполезное тепло. Поэтому желательно, чтобы рабочий орган опережал в своём развитии остальные части системы, то есть обладал большей степенью динамизации по веществу, энергии или организации.

Часто изобретатели совершают ошибку, упорно развивая трансмиссию, управление, но не рабочий орган. Такая техника, как правило, не даёт значительного прироста экономического эффекта и существенного повышения КПД.

Пример:

- Производительность токарного станка и его техническая характеристика оставались почти неизменными на протяжении многих лет, хотя интенсивно развивались привод, трансмиссия и средства управления, потому что сам резец как рабочий орган оставался прежним, то есть неподвижной моносистемой на макроуровне. С появлением вращающихся чашечных резцов производительность станка резко поднялась. Ещё больше она возросла, когда была задействована микроструктура вещества резца: под действием электрического тока режущая кромка резца стала колебаться до нескольких раз в секунду. Наконец, благодаря газовым и лазерным резцам, полностью изменившим облик станка, достигнута невиданная ранее скорость обработки металла.

Закон перехода с макро- на микроуровень

Переход с макро- на микроуровень — главная тенденция развития всех современных технических систем.

Для достижения высоких результатов задействуются возможности структуры вещества. Вначале используется кристаллическая решетка, затем ассоциации молекул, единичная молекула, часть молекулы, атом и, наконец, части атома.

Пример:

- В погоне за грузоподъёмностью на закате поршневой эры самолёты снабжались шестью, двенадцатью и более моторами. Затем рабочий орган — винт — всё же перешел на микроуровень, став газовой струёй.

2.3. Внешние факторы, воздействующие на техногенные системы (Акимов и др., 2002)

В зависимости от характера воздействий на технические системы внешние воздействующие факторы (ВВФ) делят на семь классов:

- механические ВВФ,
- климатические и другие природные ВВФ,
- биологические ВВФ,
- радиационные ВВФ,
- ВВФ электромагнитных полей,
- ВВФ специальных сред,
- термические ВВФ

Каждый класс в зависимости от физической, биологической или химической сущности явлений, лежащих в основе ВВФ, делят на группы, а каждую группу - на виды, с соответствующими характеристиками.

Для элементов технических систем, расположенных на земной поверхности, определяющими и дестабилизирующими внешними факторами являются климатические. Класс климатических факторов подразделяют на группы и виды факторов (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Класс климатических и других природных ВВФ

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

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

Формирование климата обуславливается воздействием режима солнечной радиации, циркуляции атмосферного воздуха, влагооборота, физико-географических особенностей, воздействием человека, а также географическим положением территории. Основные характеристики климатических районов даны в табл. 2.1.

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

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

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

Поскольку под действием климатических факторов снижается надежность элементов систем (прежде всего, изменяются свойства конструкционных и эксплуатационных материалов), следует рассмотреть влияние климатических факторов на эти материалы.

Воздействие климатических факторов

Воздействие температуры

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

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

Различают три вида тепловых воздействий:

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

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

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

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

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

Высокая скорость изменения температуры (тепловой удар), имеющие место при аperiодических воздействиях тепла, приводит к быстрому изменению размеров материалов, что является причиной повреждений. Этот факт чаще проявляется при недостаточном учете коэффициентов линейного расширения сопрягаемых материалов. В частности, при повышенных температурах заливочные материалы размягчаются, происходит расширение сопрягаемых с ними материалов, а при переходе к отрицательным температурам происходит сжатие

заливочных материалов и растрескивание их в местах соприкосновения с металлами. При отрицательных температурах возможна значительная усадка заливочных материалов, следовательно, у электроизделий повышается возможность электрического перекрытия. Низкие температуры непосредственно ухудшают основные физико-механические свойства конструкционных материалов, повышают возможность хрупкого разрушения металлов. Низкие температуры существенно влияют на свойства полимерных материалов, вызывая процесс их стеклования, высокие же температуры изменяют упругость этих материалов. Нагрев полимерных изоляционных материалов резко снижает их электрическую прочность и сроки службы.

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

Характер изменения температуры во времени (в течение года) описывается случайным процессом:

$$T(t) = \bar{T}(t) + \Psi(t), \quad (2.12)$$

где \bar{T} - средняя температура, соответствующая времени t , °С; t - время от 0 ч 1 января до 24 ч 31 декабря;

Ψ - случайная составляющая температуры, соответствующая времени t , °С.

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

$$\bar{T}(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t, \quad (2.13)$$

где A_0 - коэффициент численно равный математическому ожиданию средней годовой температуры, °С; A_i, B_i - амплитуды колебаний математического ожидания температуры, соответствующие частоте ω_i .

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

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta t), \quad (2.14)$$

где α - коэффициент линейного расширения; железо $=11-15 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹; дерево $50-60 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹; алмаз $-0,91 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

t_1 - температура в первом слое;

t_2 - температура во втором слое; $t_2 = t_1 + \frac{\partial t}{\partial l} \Delta l$;

Δl - расстояние между слоями.

Дополнительные (температурные) напряжения в материале $\sigma_t = \varepsilon_t E$, где E - модуль упругости материала.

Зависимость удельной электропроводности материала от его температуры определяется уравнением

$$\sigma_{\vartheta} = \sigma_{\vartheta_0} e^{\alpha t} \approx \sigma_{\vartheta_0} (1 + \alpha t), \quad (2.15)$$

где σ_{ϑ_0} - удельная электропроводность при $t = 0$ °С; α - температурный коэффициент.

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

Предложен ряд эмпирических формул, описывающих зависимость времени до разрыва τ (или скорости разрушения v_2) от этих факторов. Наибольшее признание получила установленная экспериментально для многих материалов (чистых металлов, сплавов, полимерных материалов, полупроводников органического и неорганического стекла и др.) следующая температурно-временная зависимость прочности - между напряжением σ , температурой T и временем τ от момента приложения постоянной механической нагрузки до разрушения образца

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (2.16)$$

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

Графики зависимости $\lg \tau$ от σ для различных T представляют собой семейства прямых линий, сходящихся при экстраполяции в одной точке при $\lg \tau = \lg \tau_0$ (рис. 2.5).

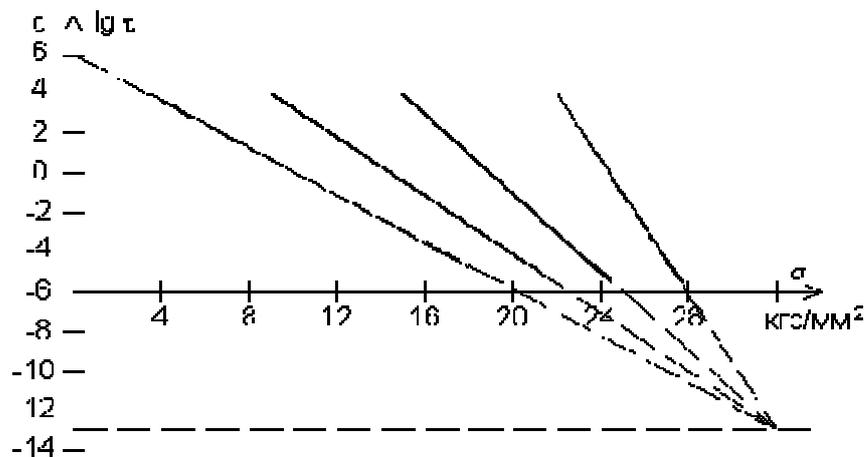


Рис.2.5. Типичная зависимость долговечности материала от напряжения при различных температурах ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$)

Для скорости процесса разрушения, следовательно,

$$v_{\varepsilon} \approx \tau^{-1} = \tau_0 \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right). \quad (2.17)$$

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

$$\gamma = \alpha RT, \quad (2.18)$$

где α - тангенс угла наклона прямой $\lg = f(\sigma)$.

Низкие температуры изменяют физико-механические свойства конструкционных и эксплуатационных материалов.

Результатами воздействия низких температур являются:

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

Последствиями этих факторов являются:

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

Это влияние низких температур на свойства материалов вызывает увеличение количества пусковых, нагрузочных и рабочих отказов, а также снижение сроков службы элементов машин.

Воздействие солнечной радиации

На открытом воздухе поверхности изделий подвергаются действию прямых солнечных лучей. В материалах, используемых в конструкциях систем, под действием солнечной радиации возникают сложные процессы, вызывающие старение этих материалов. Кроме того, солнечная радиация является основным

фактором формирования теплового режима атмосферы и поверхности земли. Поэтому влияние на свойства материалов высоких и низких температур воздуха определяется, в конечном счете, влиянием солнечной радиации на тепловой режим воздуха.

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

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

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

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

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

Поток суммарной радиации также зависит и от самих облаков, если солнце просвечивает через перистые облака, то поток суммарной радиации будет изменяться от $4,9 \cdot 10^{-3}$ до $64,4 \cdot 10^{-3}$ Вт·см⁻², если же облака слоистые - от $3,5 \cdot 10^{-3}$ до $38,5 \cdot 10^{-3}$ Вт·см⁻². Влияние на величину суммарной радиации оказывает также высота облаков, если облака высокие, поток изменяется от $5,6 \cdot 10^{-3}$ до $49,7 \cdot 10^{-3}$ Вт·см⁻², если низкие - от $6,3 \cdot 10^{-3}$ до $27,3 \cdot 10^{-3}$ Вт·см⁻². Это все проверить

Интегральная плотность теплового потока солнечной радиации зависит от высоты. До 15 км интегральная плотность теплового потока составляет 1125 Вт/м², в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра ($\lambda = 280-400$ мкм) - 42 Вт/м², свыше 15 км - 1380 Вт/м², плотность потока ультрафиолетовой части спектра - 10,0 Вт/м².

Изменение плотности теплового потока солнечной радиации оценивается отношением ее максимального значения к минимальному, выраженному в %.

Наименьшие суточные изменения наблюдаются в пустынных районах, для которых характерна безоблачность.

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

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

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

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

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

Основное действие солнечного излучения - нагрев поверхности изделий и, как следствие, повышение температуры внутри устройства. Нагрев тела солнечными лучами зависит от интенсивности солнечной радиации, температуры окружающей среды и от отражательной способности тела. Будучи нагретым, тело само становится источником излучения. Закономерность теплообмена поверхностей удобно проследить на теплообмене тонкостенного металлического кожуха. Для случая матового черного кожуха, внутри которого нет источника, излучение энергии можно представить схемой на рис. 2.6.

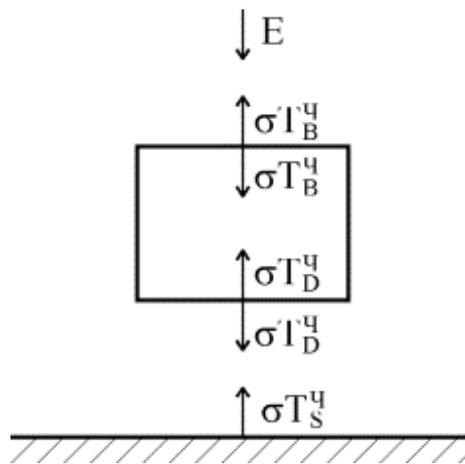


Рис. 2.6. Схема для определения баланса излучения стенок кожуха

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

Верхняя крышка кожуха, поглощающая тепло солнечных лучей, излучает его наружу и внутрь кожуха ($\sigma T_B^ч$). Нижняя стенка кожуха (дно) поглощает тепло, излучаемое верхней крышкой, и излучает его внутрь кожуха и наружу ($\sigma T_D^ч$). При расположении кожуха на почве нижняя стенка отдает тепло почве и может получать тепло от нее ($\sigma T_S^ч$)

При температурном равновесии системы справедливы следующие математические зависимости:

$$\sigma T_B^4 = \sigma/2 (T_D^4 - T_B^4);$$

$$\sigma T_D^4 = 1/2(1,6 + \sigma T_B^4);$$

где T_B - температура крышки кожуха, К;

T_D - температура дна кожуха, К;

T_S - температура почвы, К;

σ - постоянная Больцмана.

Воздействие влажности

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

Характер неблагоприятного влияния влажности воздуха на материал зависит от процентного содержания влаги в воздухе. При большом содержании влаги в воздухе (более 90%) она снижает служебные свойства материалов, проникая внутрь этих материалов или образуя на их поверхности пленки жидкости. При малом содержании влаги в воздухе (ниже 50%), влага, содержащаяся в ма-

териалах, испаряется в воздух, что также изменяет свойства материалов: они становятся хрупкими, в них появляются трещины.

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

$$\varphi(t) = C_0 + \sum_{j=1}^n (C_j \cos \omega_j t + D_j \sin \omega_j t) \quad (2.19)$$

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

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

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

Скорость проникания влаги в материалы увеличивается при повышении температуры окружающего воздуха. Влага, поглощенная материалом или проникшая в него другими путями, резко снижает его объемное сопротивление (рис. 2.7). Зависимость удельной электропроводимости диэлектриков от их влажности определяется как

$$\sigma_z = \sigma_{z_0} e^{\kappa(z-z_0)}, \quad (2.20)$$

где σ_{z_0} - удельная электропроводимость при $t = 0^\circ\text{C}$; z - абсолютная влажность материала; κ - коэффициент, зависящий от материала.

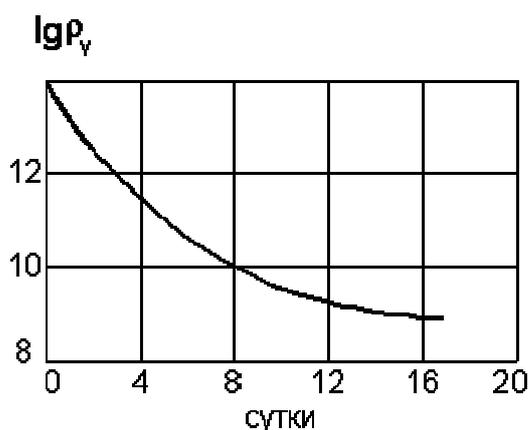


Рис. 2.7. Изменение удельного объемного сопротивления гетинакса в зависимости от длительности увлажнения при относительной влажности воздуха 70-98% и температуре 35 °C

Оседая на поверхности материала, влага образует тонкую пленку, в результате поверхностное сопротивление материалов снижается на несколько порядков (рис. 2.8). Наибольшее снижение поверхностного сопротивления изоляторов происходит при загрязнении пленки продуктами газов и пыли.

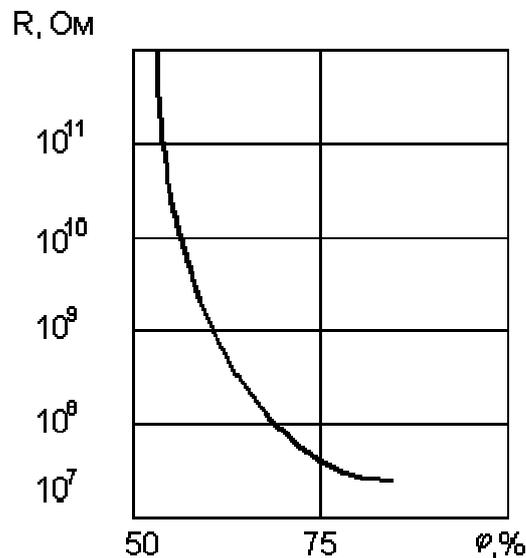


Рис. 2.8. Зависимость поверхностного сопротивления R изоляции керамической детали от влажности воздуха φ

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

Увлажнение материалов повышает скорость протекания коррозионных процессов:

$$\frac{dy}{dt} = C_p^n k_p \exp\left(\frac{-E_k}{RT}\right), \quad (2.21)$$

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

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

$$t = \frac{1}{k_0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2.22)$$

где k_0 - постоянный коэффициент, зависящий от внутренних параметров материала.

При повышении влажности воздуха, плотности тумана и оседании росы увеличивается толщина пленки влаги на поверхности металла, которая определяет виды атмосферной коррозии (рис. 2.9).

Сухая коррозия (участок I) происходит при отсутствии пленки влаги на поверхности металла вследствие окисления поверхностного микрослоя металла кислородом воздуха, что и определяет малую скорость этого вида коррозии.

При влажной коррозии (участок II) скорость коррозии резко повышается с увеличением толщины пленки влаги, образующейся на поверхности вследствие конденсации. Эта конденсация может быть капиллярной, адсорбционной или ионной.

При мокрой коррозии (участок III) толщина пленки влаги наибольшая (при 100% влажности воздуха). Снижение скорости коррозии в этом случае объясняется затруднительностью диффузии кислорода воздуха через толстую пленку влаги.

Участок IV отвечает случаю погружения металла в жидкость.

Кроме того, влага может вызывать изменение физических свойств материалов - их плотности, температуры плавления, снижать грибостойкость материалов.

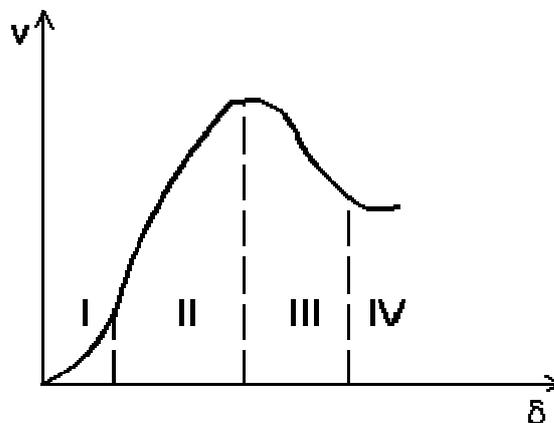


Рис. 2.9. Зависимость скорости v атмосферной коррозии от толщины δ пленки влаги на поверхности металла

Воздействие давления

На конструкционные материалы немаловажное значение оказывает атмосферное давление.

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

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

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

Пониженное давление также влияет на полупроводники, вызывая ухудшение теплоотдачи и уменьшение пробивного напряжения

Воздействие ветра и гололеда

На надежность технических систем ветер оказывает разнообразное влияние: в одних случаях - благоприятное, в других - неблагоприятное влияние на процессы в материалах машин. Кроме того, ветер при больших скоростях действует как силовой (нагрузочной) фактор, создавая дополнительные напряжения. Сила ветра зависит от перепада давлений воздуха, т.е. от расстояния между изобарами.

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

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

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

$$F(x) = \exp(-K_{xT} x^{n_{xT}}), \quad (2.23)$$

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

Исследования статистических связей между толщиной стенки δ эквивалентного гололеда (ЭГ) и максимальными скоростями ветра v при гололедно-изморозительных образованиях (ГИО) показывают, что связь между этими переменными незначительна.

При расчете прочности изделий используют метод эквивалентных нагрузок, основанных на обработке графиков загрузки изделий во времени. Для построения этих графиков (рис. 2.10) необходимы сведения о суммарной продолжительности ветра и эквивалентного гололеда (ЭГ) $t_{\Sigma}^{мф}$ (суммарная продолжительность действий интервала интенсивности МФ).

При переходе льда в жидкую фазу увеличенные размеры пор во многих случаях сохраняются, что создает рыхлость материала. Лед или вода снижают сопротивление электрических проводников. Сухой снег при метелях оказывает истирающее воздействие на поверхности материалов.

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

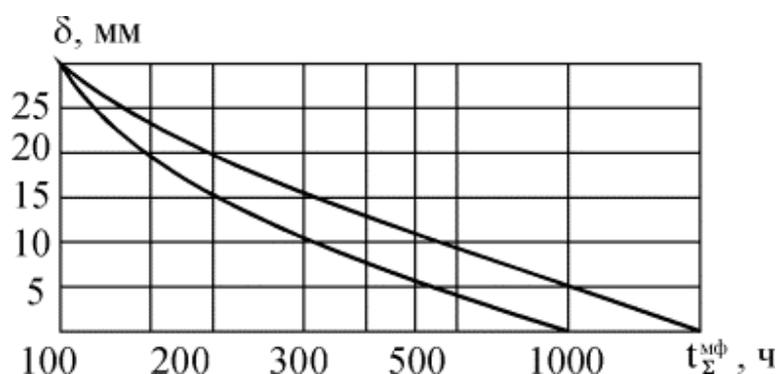


Рис. 2.10. Зависимость толщины стенки ЭГ δ от суммарной продолжительности гололеда $t_{\Sigma}^{мф}$

Распределенная ветровая нагрузка p на 1 м^3 наветренной поверхности определяется зависимостью $p = q_0 n_h c \beta$, где q_0 - динамическое давление ветра на высоте 10 м над поверхностью Земли, Па; n_h - поправочный коэффициент на увеличение динамического давления в зависимости от высоты над поверхностью земли; c - аэродинамический коэффициент, зависящий от аэродинамических свойств элементов машины; β - коэффициент, учитывающий воздействие, вызываемое пульсацией динамического давления ветра.

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

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

Пульсация динамического давления ветра может рассматриваться как стационарный случайный процесс.

Динамическая нагрузка, определяемая пульсацией динамического ветра с учетом собственных колебаний элемента, определяется зависимостью

$$P_{sq} = M_s \sqrt{\sum_j^n \bar{\eta}_{sj}^2 * \bar{\xi}_j^2}, \quad (2.24)$$

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

Воздействие примесей воздуха

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

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

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

Существенное влияние на конструкционные материалы оказывают содержащиеся в атмосфере коррозионные агенты. Основными повреждающими веществами являются катион водорода H^+ , диоксид серы, оксиды азота, фор-

мальдегид, озон, пероксид водорода. Их повреждающее действие непосредственно обусловлено интенсивностью каталитических реакций с участием металлов, а также синергизмом.

Скорость коррозии металлов в атмосфере определяется продолжительностью увлажнения их поверхности и концентрацией коррозионно-активных компонентов. Чистый влажный воздух даже при относительной влажности, равной 100%, слабо действует на железо и медь, однако при наличии в атмосфере всего лишь 0,01% SO_2 скорость коррозии возрастает в 100 раз. Сернистый газ образуется в основном в результате сгорания низкосортных топлив. После сгорания образуется сернистый ангидрид SO_2 , который окисляется в воздухе, образуя в нем серный ангидрид SO_3 , соединяясь с водой SO_3 образует сернистую кислоту H_2SO_3 и серную кислоту H_2SO_4 , которые обладают разрушающим действием. Для определения условия воздействия загрязнений используют зависимость в координатах «концентрация-повреждение». Скорость старения материала, как правило, рассматривают во времени (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Разрушающее действие на материал и сокращение срока службы изделия t

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

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

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

Высокая гигроскопичность хлористого натрия способствует наличию пленки электролита на поверхности даже при сравнительно низкой влажности воздуха. Растворяясь в пленке влаги, хлористый натрий повышает ее электро-

проводность. Кроме того, ион хлора обладает способностью активно разрушать защитные окисные пленки продуктов коррозии, замещая кислород.

Для процессов атмосферной коррозии характерно несколько основных видов взаимодействия:

– сухая поверхность - газové примеси; скорость процессов определяется кинетикой сорбции кислых газов и их последующим растворением с образованием кислот;

– влажная поверхность - газové примеси; скорость процесса лимитируется растворением газов в слое воды, образованием кислоты и скоростью ее взаимодействия с поверхностью металла;

– сухая или влажная поверхность - мелкодисперсные частицы; особенности их действия связаны с осаждением твердых частиц кислотного характера на поверхности с последующим образованием кислот при взаимодействии с влагой;

– прямое действие катионов H^+ , содержащихся в осадках.

При воздействии осадков и газов наиболее часто наблюдается равномерная коррозия, вследствие чего уменьшается толщина. Скорость коррозии можно охарактеризовать ее глубиной Π , т.е. глубиной проникновения коррозионного разрушения в металл (в мм) за единицу времени (1 год)

$$\Pi = \frac{8,76}{\gamma} * K, \quad (2.25)$$

где γ - плотность металла; K - массовый показатель коррозии.

Воздействие биологических факторов

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

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

Следует отметить большую скорость распространения плесени и огромную (до 40000) разновидность плесневых грибов. Для ее образования необходимы питательная среда, тепло и малая вентиляция (ее отсутствие) воздуха. Особенно благоприятные условия для образования плесени возникают при функционировании систем в районах с повышенной влажностью и температу-

рой (тропики, субтропики, районы южных морей и крупных озер). Особенно подвержены действию грибковой плесени пластмассы на целлюлозной основе. Плесень появляется и на неорганических изоляционных материалах, стекле и металле.

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

Старение материалов

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

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

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

Старение материалов вызывает снижение значений их характеристик во времени. Характер этого снижения определяется начальными свойствами, напряженным состоянием материала, интенсивностью воздействия внешних факторов. Во всех случаях старение материалов представляет собой необратимый процесс.

В общем виде процесс снижения свойств материалов может быть представлен некоторыми кривыми (рис. 2.12). В зависимости от назначения материала снижение его свойств допустимо до некоторых предельных значений $X_{пр}$, это и определяет продолжительность использования материала.

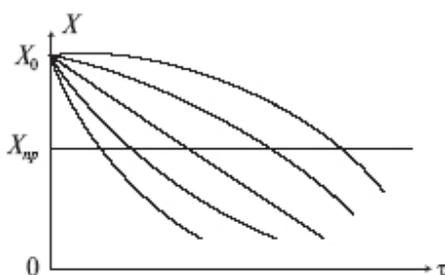


Рис. 2.12. Схема снижения свойств материалов в процессе старения

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

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

В табл. 2.2 для металлов представлены типовые закономерности протекания процессов старения во времени. Они относятся к одностадийным процессам, когда в течение рассматриваемого периода не происходит изменения физико-химической картины процесса.

В табл. 2.3 дана классификация процессов старения по месту их протекания и внешнему проявлению и указаны основные разновидности каждого процесса. Наиболее просто протекают стационарные процессы, когда скорость процесса постоянна или колеблется относительно среднего значения. Это происходит в том случае, если факторы, влияющие на скорость процесса, стабилизировались, и нет причин, изменяющих интенсивность процесса. Зависимость $U(t)$ имеет обычно линейный или близкий к нему характер. Такая закономерность характерна для установившегося периода изнашивания, для некоторых видов коррозии и других процессов. Если при старении возникают факторы, которые интенсифицируют или, наоборот, замедляют скорость его протекания, т.е. скорость процесса изменяется монотонно, функция $U(t)$ будет иметь нелинейный вид и соответственно описывать ускорение или затухание процесса повреждения материала. Ход процесса в этом случае связан с тем, что его скорость зависит не только от внешних факторов, но и от степени повреждения U . Поэтому сам процесс (его результат) влияет на интенсивность дальнейшего его протекания

$$\frac{dU}{dt} = f(U). \quad (2.26)$$

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

Таблица 2.2

Типовые закономерности протекания во времени процессов старения металлов

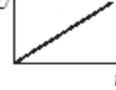
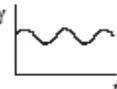
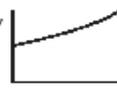
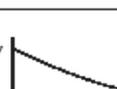
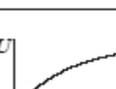
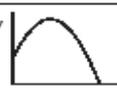
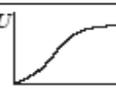
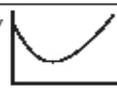
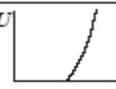
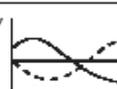
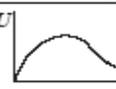
Процессы (по γ -характеристике)		$\gamma(t) = dU / dt$	$U(t)$	Примеры
Стационарные	Постоянные			Износ: $U = kt$
	Псевдостационарные			Износ при переменных режимах
Монотонные	Возрастающие			Износ при засорении поверхностей: $U = kt^n, n > 1;$ $U = A(e^{kt} - 1)$
	Убывающие			Износ в период приработки,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

Таблица 2.3

Классификация процессов старения по месту их протекания
и внешнему проявлению

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

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

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

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

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

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

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

Факторы нагрузки

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

Механическая энергия приводит к изнашиванию сопряжений, искажению первоначальной формы элементов и при достижении определенных отклонений от первоначальных значений возникает отказ. Таким образом, нарушается основное условие, предопределяющее безопасную работу оборудования, которое заключается в том, что его составные части должны выдерживать заданные рабочие нагрузки и, таким образом, обеспечивать безопасность окружающей среды.

К причинам механических повреждений элементов и систем в целом относятся:

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

- нарушение сварных швов и соединительных фланцев.

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

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

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

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

ГЛАВА 3 БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1. Определение опасности технических систем

Экосистема техногенная – экосистема, возникшая под влиянием техногенных факторов.

Фактор техногенный – 1. любое воздействие, связанное с техническими средствами. 2. влияние, оказываемое промышленной деятельностью на организмы, биогеоценоз, ландшафт, биосферу (в отличие от естественных, или природных факторов). Технические факторы обуславливают возникновение и развитие техногенеза. Поскольку практически все обл. деятельности человека носят все более индустриальный характер (добывающая и обрабатывающая отрасли, с.-х. технологии, коммунальное хозяйство и т.п.), фактор техногенный по сути становится синонимом антропогенного фактора.

Техногеосистема - совокупность элементов земной коры и антропогенных элементов (постройки, транспортные системы, рекультивированные участки и др.), находящихся в отношениях и связях между собой и образующих определенную целостность, единство. Термин **техногеосистема** близок понятиям ландшафт антропогенный, ландшафт культурный, ландшафт техногенный.

Техногенез - процесс изменения природных комплексов под воздействием производственной деятельности человека. Обычно выделяют геохимические аспекты Т., масштабы которого превосходят многие природные

Техносфера - часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (механизмы, здания, сооружения и т.д.) с помощью прямого или косвенного воздействия технических средств в целях наилучшего соответствия социально-экономическим потребностям человека.

Под технической системой (объектом) понимается упорядоченная совокупность отдельных элементов, связанных между собой функционально и взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение некоторых заданных функций при различных состояниях работоспособности. Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности: сооружения, установки, аппараты, устройства, агрегаты и отдельные детали.

Признаком системы является структурированность, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели. То или иное потенциально угрожающее состояние, связанное в деятельностью производственного объекта, может реализоваться в результате отказа технического устройства (оборудования), ошибочного проектного решения, ошибки персонала, обслуживающего технику, производственной неполадки, вредных воздействий при утилизации техники и отходов ее использования, внешних нештатных факторов и т.д.

Аддитивность – суммирование эффектов комбинации и сочетания факторов химической, физической и биологической природы. Может быть полной (если воздействие агентов представляет сумму эффектов от действия каждого агента) и неполной (если величина воздействия меньше суммы эффектов от влияния каждого агента, но больше, чем действия какого-либо одного из них).

Синергизм - комбинированное воздействие двух или более факторов (обычно химических), характеризующееся тем, что их совместное биоло-

гическое действие значительно превышает эффект каждого компонента и их суммы.

3.1.1. Опасность

Опасность - объективно существующая возможность негативного воздействия на объект или процесс, в результате которого может быть причинен какой-либо ущерб, вред, ухудшающий состояние, придающий развитию нежелательные динамику или параметры.

Другими словами, **опасность** - следствие действия негативных (вредных и опасных) факторов на определенный объект (предмет) воздействия.

Классификация факторов опасности «источников опасности»:

1 экологические факторы - факторы, обусловленные причинами природного характера;

2 социально-экономические факторы - факторы, обусловленные причинами социального, экономического, психологического характера;

3 техногенные (или антропогенные) факторы - факторы, обусловленные хозяйственной деятельностью людей;

4 военные факторы - факторы, обусловленные работой военной промышленности.

Все эти факторы и их воздействия необходимо рассматривать комплексно с учетом их взаимного влияния и связей иерархического характера.

Необходимо отметить, что в некоторых случаях возникновения опасных факторов носит вероятностный характер (аварии, стихийные бедствия и катастрофы и т.п.), в других случаях и существование детерминировано (например, загрязнение окружающей среды).

Следовательно, «**опасность**» - это ситуация, постоянно присутствующая в окружающей среде и способная в определенных условиях привести к реализации в окружающей среде нежелательного события - возникновению опасного фактора.

Опасность - свойство, внутренне присущее сложной технической системе. Она может реализоваться в виде **прямого** или **косвенного ущерба** для объекта (предмета) воздействия постепенного или внезапного и резкого - в результате отказа системы.

Определяющие признаки - возможность непосредственного отрицательного воздействия на объект (предмет); возможность нарушения нормального состояния элементов производственного процесса, в результате которого могут возникнуть нежелательные события.

Наличие хотя бы одного из указанных признаков является достаточным для отнесения факторов к опасным или вредным.

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

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

Таким образом, для реализации опасности необходимо наличие:

1. источника вреда
2. потенциальной жертвы
3. ситуации причинения ущерба.

Наличие, реализация и отсутствие опасности проиллюстрированы на рис. 3.1 – 3.3 соответственно.

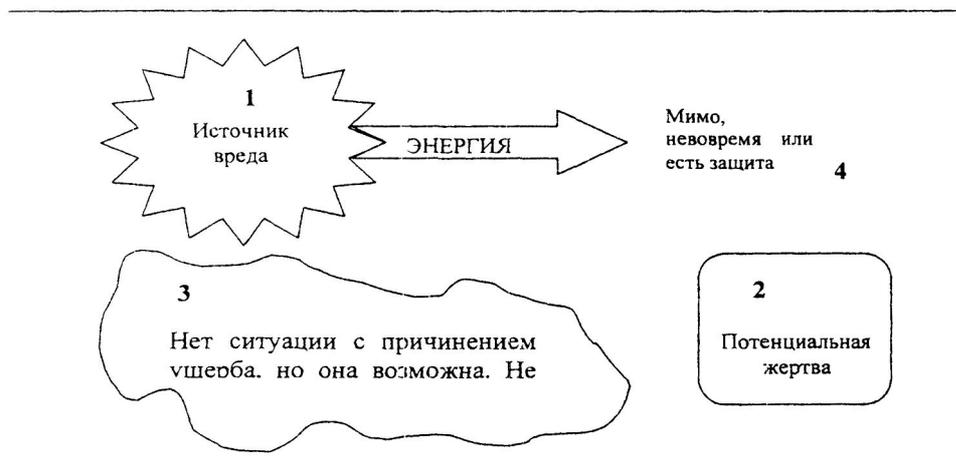


Рис. 3.1. *Иллюстрация наличия опасности*

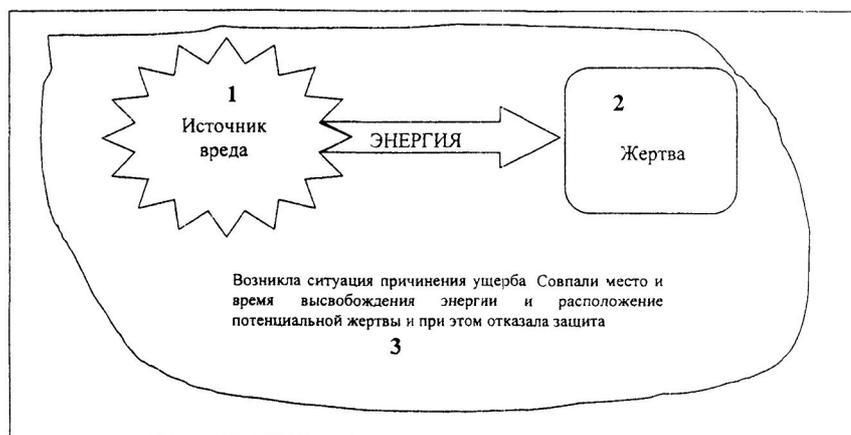


Рис. 3.2. *Иллюстрация реализации опасности*



Рис. 3.3. *Иллюстрация отсутствия опасности*

3.1.2. Источники опасности

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

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

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

Принципы, факторы и причины усиления техногенной опасности

Анализ имеющихся статистических данных по аварийности и травматизму свидетельствует, что главную угрозу представляют потоки энергии и вредных веществ, а основные *закономерности* в их появлении характеризуются следующим:

- а)** аварийность и травматизм можно интерпретировать как совокупность сравнительно редких, случайных событий-происшествий;
- б)** возникновение каждого из них обусловлено чаще всего не отдельно взятой причиной, а цепью соответствующих предпосылок;
- в)** инициаторами и звеньями такой цепи служат ошибки людей, отказы техники и / или нерасчетные воздействия на них извне.

Выявленные выше закономерности позволили сформулировать **энергоэнтропийную концепцию техногенного риска**, необходимую для обоснования объекта и предмета соответствующей деятельности, а также формулирования соответствующих принципов и методов.

Под энтропией принято принимать меру хаоса, дезорганизации и структурной неупорядоченности систем, интенсивности разрушения связей между их элементами.

Сущность энергоэнтропийной концепции заключается в следующем:

1. Техногенная опасность связана с энергопотреблением-выработкой, хранением и преобразованием механической, электрической, химической и других видов энергии.
2. На практике она реализуется в результате нежелательного высвобождения накопленных потенциалов энергии и разрушительного распространения соответствующих потоков (рис. 3.4 - *А.И. Гражданкин, 2009*).
3. Внезапный выход и нежелательное распространение потоков энергии и вещества может сопровождаться техногенными происшествиями с гибелью людей, повреждениями техники и/или природной среды.
4. Данные происшествия вызваны предпосылками, приводящими к потере управления энергомассообменом, разрушительному воздействию его потоков на людей, оборудование и внешнюю среду
5. Указанные предпосылки делятся на ошибочные действия людей, отказы технологического оборудования и неблагоприятные воздействия на них извне.

Таким образом (Гражданкин, 2009)

- производственная деятельность связана с энергопотреблением (выработка, хранение, преобразование различных видов энергии);
- Уменьшение энергетических потенциалов сопровождается совершением работы;
- Диссипация - одно из основных свойств энергии: энтропия (мера хаоса) закрытой системы самопроизвольно увеличивается (Второе начало термодинамики);
- Неуправляемое высвобождение накопленной энергии приводит к аварии («с точки зрения энергии» это направление более простое, чем совершение полезной «для человека» работы).

Правомерность энергоэнтропийной концепции, как отмечают авторы, подтверждается эмпирическими данными: все известные техногенные происшествия обусловлены разрушительным высвобождением энергии и вредных веществ.

Научно-технический прогресс в XX веке привел к усилению техногенной опасности, и этот поворот вызван следующими причинами:

- 1 Развитие производства вызвало непомерное увеличение объемов материального обмена с природой и энергетического уровня обмена и усиление

негативных техногенных факторов. В результате чего нагрузка на природные защитные механизмы достигла уровня, превышающего подчас их возможности.

2. Прирост производственного потенциала совершался за короткий промежуток времени, в течение которого не могла произойти адаптация природной среды.

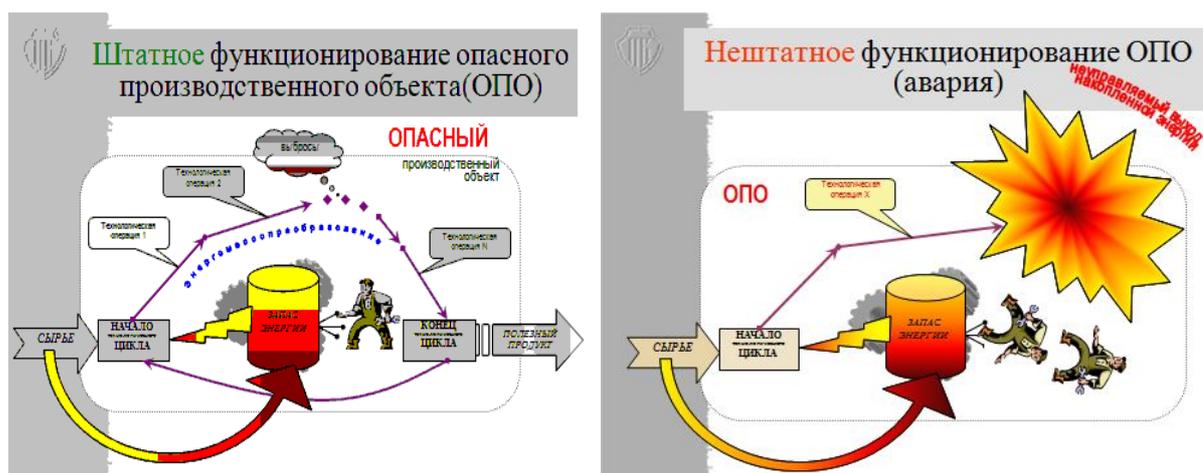


Рис. 3.4. Функционирование опасного технического объекта

Таким образом, к общим факторам усиления техногенной опасности следует отнести объективно существующее противоречие между растущими потребностями человечества и скудеющими возможностями природы по их удовлетворению и как следствие между все увеличивающимся числом новых для человека вредных факторов и имеющимися у него защитными механизмами.

Академик К. Фролов объясняет наблюдаемую в РФ устойчивость тенденции нарастания техногенной угрозы тем, «что сложные технические системы, представляющие опасность для людей и окружающей среды, создавались, как правило, на основе использования традиционных правил проектирования и простейших методов расчета и испытаний, не отвечающих в полной мере требованиям к обоснованию безопасности таких систем».

Условия, при которых реализуются потенциальные опасности, называются *причинами*. Они характеризуют совокупность обстоятельств, благодаря которым опасности проявляются и вызывают те или иные нежелательные события - последствия. Формы нежелательного последствия различны: травмы, материальный ущерб, урон окружающей среде и др.

«**Опасность - причина - нежелательные последствия**» - это логический процесс развития, реализующий потенциальную опасность в реальное нежелательное последствие. Как правило, этот процесс является многопричинным.

Типичная причинная цепь техногенных происшествий в общем случае представляет следующую последовательность событий-предпосылок: ошибка человека, отказ используемого им оборудования и/или недопустимое для них внешнее воздействие —> появление потока энергии или вещества в неожиданном месте и/или не вовремя <-> отсутствие (неисправность) предусмотренных на эти случаи средств защиты и/или неправильные действия людей в такой ситуации <-> воздействие движущихся потоков на незащищенные элементы техники, людей и/или окружающей их среды <-> ухудшение свойств и/или целостности соответствующих материальных, людских и природных ресурсов.

Анализ причин аварийных ситуаций показывает, что основными **факторами** аварийности и травматизма следует считать слабые практические навыки работающих, их низкую технологическую дисциплинированность и неумение правильно оценивать информацию, низкое качество конструкции рабочих мест (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Основные причины и факторы аварийности и травматизма (Гражданкин, 2009)

Причина тенденций роста количества чрезвычайных ситуаций заключается и в том, что при создании и эксплуатации техники не учитывается в должной мере принцип внутренней безопасности систем -система должна обладать защитными ресурсами, достаточными для исключения влияния дестабилизирующих факторов.

С целью преодоления негативных тенденций с аварийностью в промышленности ГД РФ 21.07.1997 г. принят и вступил в силу Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» №116-ФЗ. Закон определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасности эксплуатации опасных производственных объектов, а также меру административной и уголовной ответственности предприятий и направлен на предупреждение аварий на этих объектах и обеспечение готовности к их локализации и ликвидации.

Статья 14 этого закона однозначно увязывает возможность получения предприятиями лицензий на соответствующий вид деятельности с необходимостью представить в органы государственного надзора и местного самоуправления «Декларацию безопасности промышленного объекта», а также получить положительное экспертное заключение по ней от уполномоченной Госгортехнадзором РФ для этой цели специализированной организации.

Статья 15 требует от потенциально опасного предприятия заключить с соответствующими компаниями договор страхования социальной и материальной ответственности перед третьими (физическими и юридическими) лицами, которым может быть нанесен ущерб в результате деятельности предприятия.

До принятия этого закона ответственность предприятия - собственника опасного промышленного объекта перед третьими лицами брало на себя государство. Центральной задачей декларирования промышленной безопасности является основанное на фактических сведениях, официально заверенных руководителем потенциально опасного производственного объекта, информационное отражение реального состояния промышленной безопасности на объекте, включающее всесторонний объективный анализ характерных опасностей и оценку риска и описание принятых мер технического и организационно-методического характера по предотвращению и локализации аварии. Наиболее значимым и ответственным разделом декларации является анализ риска, т.е. обоснование частоты возникновения и специфики развития различного рода аварии, а также определение количественных показателей связанных с этим социального, материального и экологического ущербов. Сочетание этих двух категорий: последствий и вероятности (обычно в виде произведения) и образует понятие *риска* - нового количественного критерия оценки безопасности, позволяющего получить универсальную шкалу для сравнения опасностей различного происхождения.

Обычно риск аварии исчисляется в единицах ущерба, отнесенных ко времени (чаще всего год)

$$Y = \sum_{i=1}^N Y_i = a(\Delta t) * \bar{y}, \quad (3.1)$$

где \bar{y} - средний ущерб при реализации опасного события, $a(\Delta t)$ – математическое ожидание числа событий за год. Суммирование производится по всей совокупности аварийных процессов, которые могут иметь место на объекте.

Отсюда следует, что прогноз уровня аварийной опасности связан с частотным анализом возможных аварийных процессов и с прогнозом ущерба при потенциальных авариях. В отличие от других подходов оценки безопасности производственной деятельности методология риска позволяет в рамках системного анализа:

1. исследовать причинно-следственный механизм (логику) возникновения различных аварий и спрогнозировать их частоту;
2. учесть влияние технологических, метеорологических, региональных и целого ряда других особенностей на характер и масштабы последствий от аварий;
3. оптимизировать управленческие решения по повышению безопасности объекта в условиях ограниченных средств. Проще говоря, она дает возможность реализовать принцип «предвидеть и предупреждать»

В законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» дано определение: «*Промышленная безопасность*» - состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных промышленных объектах и последствий указанных аварий. В последние десятилетия прошлого столетия во имя улучшения экономических показателей промышленных предприятий произошло повышение единичной мощности объектов промышленности. Конечно, все эти крупные объекты проектировались так, чтобы их надежность и безопасность была максимально высокой. Однако, несмотря на малую вероятность, аварии на таких объектах все же происходят, приводя к тяжелым последствиям. Более того, расчеты показывают, что меры, направленные на снижение вероятности таких аварий, в конечном итоге, на достижение «абсолютной» безопасности крупномасштабных объектов, связаны с очень большими экономическими затратами и делают сами эти технологии нерентабельными.

Понятно, что полностью гарантировать исключение вероятности аварийных ситуаций возможно лишь в технологических системах, лишенных запасенной энергии химически и биологически активных веществ.

Соответственно, поскольку нельзя обеспечить «абсолютную» безопасность населения и окружающей среды от техногенных и других факторов опасности, то, очевидно, следует стремиться к достижению такого уровня риска от этих факторов, который можно рассматривать как «приемлемый».

Уровень риска от факторов опасности, обусловленных хозяйственной деятельностью, является «приемлемым», если его величина (вероятность реализации или возможный при этом ущерб) настолько незначительна, что ради получаемой при этом выгоды в виде материальных и социальных благ, человек или общество в целом готово пойти на этот риск. Фактически переход на использование этого принципа означает переход от ограничения величины воздействия опасного фактора к ее снижению до оптимального уровня, принимая в расчет экономические и социальные факторы. В нашей стране четкую позицию, основанную на утверждении о том, что в сегодняшних условиях хозяйственной деятельности решение проблемы обеспечения безопасности человека и окружающей среды должно быть основано на принципе «приемлемого» риска, всегда занимал академик В. А. Легасов и его научная школа.

3.2. Риск как мера безопасности технических систем

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

В научной литературе встречается весьма различная трактовка термина «риск», и в него иногда вкладываются отличающиеся друг от друга содержания.

Например, риск в терминологии страхования используется для обозначения предмета страхования (промышленного предприятия или фирмы), страхового случая (наводнения, пожара, взрыва и пр.), страховой суммы (опасности в денежном выражении) или же как собирательный термин для обозначения нежелательных или неопределенных событий. Экономисты и статисты, сталкивающиеся с этими вопросами, понимают риск как меру возможных последствий, которые проявятся в определенный момент в будущем. В психологическом словаре риск трактуется как

действие, направленное на привлекательную цель, достижение которой сопряжено с элементами опасности, угрозой потери, неуспеха, либо как ситуативная характеристика деятельности, состоящая в неопределенности ее исхода и возможных неблагоприятных последствиях в случае неуспеха, либо как мера неблагополучия при неуспехе в деятельности, определяемая сочетанием вероятности и величины неблагоприятных последствий в этом случае.

Ряд трактовок раскрывает риск как вероятность возникновения несчастного случая, опасности, аварии или катастрофы при определенных условиях (состоянии) производства или окружающей человека среды. Приведенные определения подчеркивают как значение активной деятельности субъекта, так и объективные свойства окружающей среды.

Общим во всех приведенных представлениях является то, что риск включает неуверенность, произойдет ли нежелательное событие и возникнет

ли неблагоприятное состояние. Заметим, что в соответствии с современными взглядами риск обычно интерпретируется как вероятностная мера возникновения техногенных или природных явлений, сопровождающихся возникновением, формированием и действием опасностей и нанесенного при этом социального, экономического, экологического и других видов ущерба и вреда.

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

Применение понятия риск, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск, фактически, есть мера опасности.

Часто используют понятие «степень риска» (Level of risk), по сути не отличающееся от понятия риск, но лишь подчеркивающее, что речь идет об измеряемой величине.

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

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

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

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

Каждое нежелательное событие может возникнуть по отношению к определенной жертве — объекту риска.

На процесс зарождения и развития риска оказывает свое влияние многообразие факторов и условий, характерных для промышленной системы (рис.3.6). Знакомство с приведенной схемой позволяет выделить целый ряд первопричин риска: отказы в работе узлов и оборудования вследствие их конструктивных недостатков, плохого технического изготовления или нарушения правил технического обслуживания; отклонения от нормальных условий эксплуатации; ошибки персонала; внешние воздействия и пр.

Вследствие возможности возникновения указанных причин опасные промышленные объекты постоянно находятся в неустойчивом состоянии, которое по отношению к безопасности производства становится особенно критичным при возникновении аварийных ситуаций на объектах.

Риск возникает при следующих необходимых и достаточных условиях:

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

Между авариями в самых разных отраслях можно заметить явное сходство.

Обычно аварии предшествует накопление дефектов в оборудовании или отклонение от нормального хода процессов. Эта фаза может длиться минуты, сутки или даже годы. Сами по себе дефекты или отклонения еще не приводят к аварии, но готовят почву для нее. Операторы, как правило, не замечают этой фазы из-за невнимания к регламенту или недостатка информации о работе объекта, так что у них не возникает чувства опасности.

На следующей фазе происходит неожиданное или редкое событие, которое существенно меняет ситуацию. Операторы пытаются восстановить нормальный ход технологического процесса, но, не обладая полной информацией, зачастую только усугубляют развитие аварии. Наконец, на

последней фазе еще одно неожиданное событие — иногда совсем незначительное — играет роль толчка, после которого техническая система перестает подчиняться людям, и происходит катастрофа.

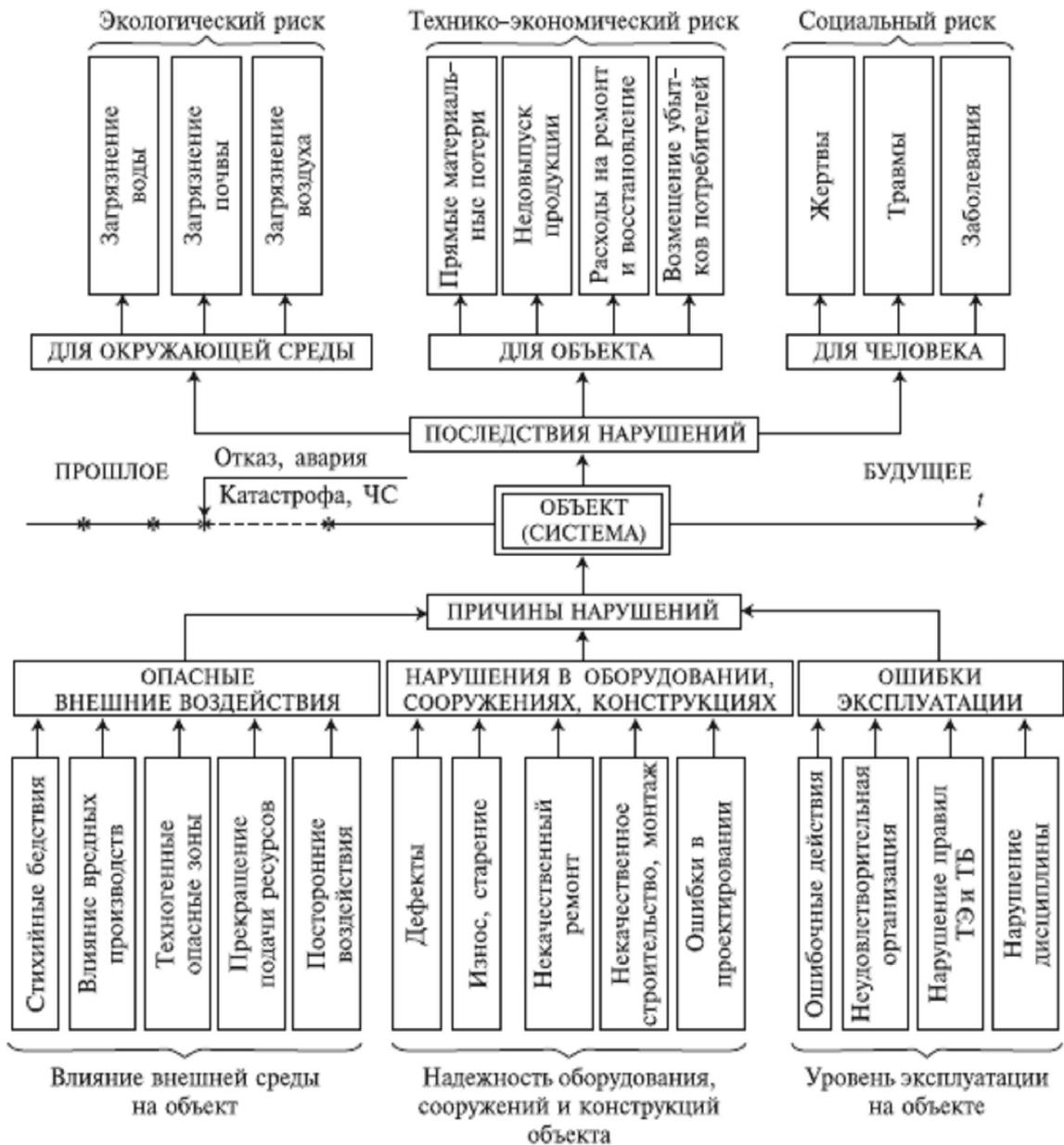


Рис. 3.6. Функциональная модель развития риска

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

Можно привести пример оценки надежности технической системы, что является одним из проявлений риска как меры ее безопасности (Ветошкин, Таранцева, 2002).

Основным показателем безотказности технического объекта с точки зрения его надежности является вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в заданном интервале времени $t=T$ не возникнет отказа этого объекта (рис. 3.7). Значение $P(t)$, как всякой вероятности, может находиться в пределах $0 \leq P(t) \leq 1$. Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $F(t)$ образуют полную группу событий, поэтому

$$P(t) + F(t) = 1 \quad (3.2)$$

Допустимое значение $P(t)$ выбирается в зависимости от степени опасности отказа. Например, для ответственных изделий авиационной техники допустимые значения $P(t) = 0,9999$ и выше, т.е. практически равны единице.

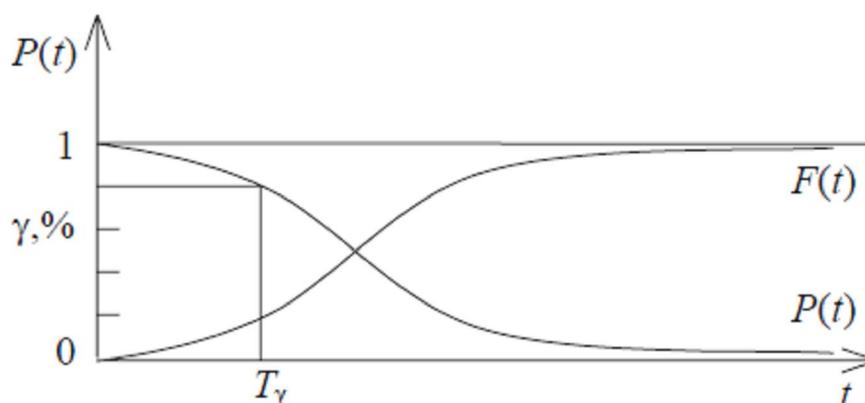


Рис. 3.7. График функции безотказной работы технического объекта

При высоких требованиях к надежности объекта задаются допустимым значением $P(t) = \gamma\%$ и определяют время работы объекта $t = T_\gamma$, соответствующее данной регламентированной вероятности безотказной работы.

Значение T_γ называется «гамма-процентным ресурсом» и по его значению судят о большей или меньшей безотказности объектов.

Причина возникновения внезапных отказов не связана с изменением состояния объекта и временем его предыдущей работы, а зависит от уровня внешних воздействий.

Внезапные отказы оцениваются интенсивностью отказов λ - вероятностью возникновения отказа в единицу времени при условии, что до этого момента времени отказ не возник:

$$\lambda = \frac{F\left(\frac{\Delta t}{t}\right)}{\Delta t} = \frac{1 - P\left(\frac{\Delta t}{t}\right)}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Основная закономерность теории надежности:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda \cdot dt} = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt\right] \quad (3.4)$$

При $\lambda = \text{const}$ получим экспоненциальный закон надежности

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.5)$$

Показатель λ измеряется числом отказов в единицу времени (1/ч).
Средний срок службы до отказа для экспоненциального закона будет

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} \quad (3.6)$$

т.е. можно записать

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{\text{ср}}}} \quad (3.7)$$

Для значений $P(t) > 0,9$ можно представить

$$P(t) = 1 - \lambda t = 1 - \frac{t}{T_{\text{ср}}} \quad (3.8)$$

При расчете надежности сложной системы используют структурные схемы (рис.3.8).

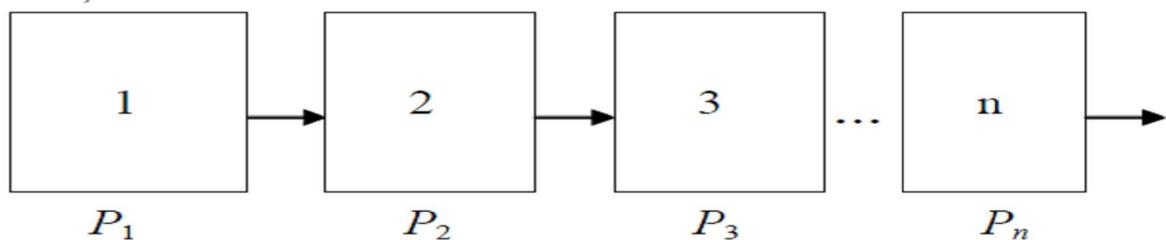


Рис. 3.8. Структурная схема надежной работы технической системы

Вероятность безотказной работы такой системы равна произведению вероятностей безотказной работы элементов:

$$P(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i \quad (3.9)$$

Сложные системы, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет наличия большого числа элементов.

Например, если узел состоит из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за выбранный промежуток времени составляет $P_i=0,99$, то вероятность безотказной работы узла будет $P(t)=(0,99)^{50} \approx 0,55$.

При внезапных отказах, которые подчиняются экспоненциальному закону

$$P(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)} = e^{-\lambda_0 t} \quad (3.10)$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ – параметр сложной системы.

Для повышения надежности сложных систем можно применять резервирование, т.е. создавать дублирующие элементы. При выходе из строя одного из элементов дублер выполняет его функции, и узел не прекращает своей работы.

При постоянном (нагруженном) резервировании, когда резервные элементы постоянно присоединены к основным и находятся в одинаковом с ними режиме работы, отказ системы является сложным событием, которое будет иметь место при условии отказа всех элементов (рис. 3.9).

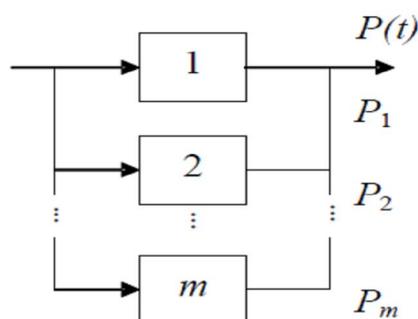


Рис. 3.9. Способ повышения безаварийной работы технической системы

Вероятность совместного появления всех отказов (по теореме умножения) составит

$$F(t) = F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_m = \prod_{i=1}^m F_i \quad (3.11)$$

Поэтому безотказность системы с параллельно резервированными элементами будет

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \quad (3.12)$$

Например, если вероятность безотказной работы каждого элемента $P_i=0,9$, а $m=3$, то $P(t)=1-(0,1)^3=0,999$. Таким образом, вероятность безотказной работы системы резко повысится, и становится возможным создание надежных систем из ненадежных элементов.

3.3. Классификация видов риска

(1. Надежность технических систем и техногенный риск. МЧС России. Электронное пособие. 2. Теория риска. Красноярский госуниверситет. 3. А.М. Козлитин. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков)

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

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

Каждое нежелательное событие может возникнуть по отношению к определенной жертве - объекту риска. Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, технический, экологический, социальный и экономический риск. Каждый вид его обуславливают характерные источники и факторы риска, классификация и характеристика которого приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Классификация и характеристика видов риска

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

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

$$R_{и} = \frac{P(f,t)}{L(f,t)} \quad (3.13)$$

где $R_{и}$ - индивидуальный риск;

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

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

Источники и факторы индивидуального риска приведены в табл. 3.2

Таблица 3.2

Источники и факторы индивидуального риска

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

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

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

$$R_T = \frac{\Delta T(t)}{T(f)} \quad (3.14)$$

где R_T - технический риск;

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

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

Источники и факторы технического риска приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Источники и факторы технического риска

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

Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия. Нежела-

тельные события экологического риска могут проявляться как непосредственно в зонах вмешательства, так и за их пределами:

$$R_o = \frac{\Delta O(t)}{O} \quad (3.15)$$

где R_o - экологический риск; ΔO - число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий в единицу времени t ; O - число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории.

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

$$R_o^m = \frac{\Delta S}{S} \cdot 100. \quad (3.15)$$

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

$$O_T = \pm \Delta L = \frac{\pm \Delta M(t)}{S}, \quad (3.16)$$

где O_T - уровень экологичности территории; ΔL - динамика плотности населения (работающих); S - площадь исследуемой территорий; ΔM - динамика прироста численности населения (работающих) в течение периода наблюдения t ; $\Delta M = G + F - U - V$, где G, F, U, V - соответственно численность родившихся за наблюдаемый период, прибывших в данную местность на постоянное местожительство, умерших и погибших, выехавших в другую местность на постоянное местожительство (уволившихся).

В этой формуле разность GU характеризует естественный, а FV - миграционный прирост населения на территории (текучесть кадров).

Положительные значения уровней экологичности позволяют разделять территории по степени экологического благополучия и, наоборот, отрицательные значения уровней - по степени экологического бедствия. Кроме того, динамика уровня экологичности территории позволяет судить об изменении экологической ситуации на ней за длительные промежутки времени, опреде-

лить зоны экологического бедствия (демографического кризиса) или благополучия.

Источники и факторы экологического риска приведены в табл. 3. 4.

Таблица 3.4

Источники и факторы экологического риска

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

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

$$R_c = \frac{1000 \cdot (C_2 - C_1)}{L} \cdot (t), \quad (3.17)$$

где R_c - социальный риск;

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

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

L - общая численность исследуемой группы.

Источники и наиболее распространенные факторы социального риска приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Источники и факторы социального риска

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

Риск социального ущерба (социальный риск) характеризует масштаб катастрофичности аварии на потенциально опасном объекте. **Социальный риск** принято представлять математическим ожиданием людских потерь – **коллективным риском $R(Y_c)$** , либо **плотностью распределения потерь**, в интерпретации В. Маршалла **F/N – диаграммой**, описывающей зависимость частоты реализации неблагоприятных событий **F**, в результате которых погибло не менее **N** человек, от этого количества человек.

Социальный риск учитывает масштаб воздействия, выражающийся в летальных исходах и поражениях людей различной тяжести, приведенных к суммарно эквивалентному

числу летальных исходов. При определении потерь общества от возможных смертельных исходов $R(Y_c)$ человеческая жизнь должна оцениваться в стоимостном выражении. В качестве такой величины используется цена спасения жизни (ЦСЖ), для обоснования которой в настоящее время применяется, по крайней мере, пять подходов с последующим сопоставлением полученных значений. В обобщенном виде ЦСЖ понимается как средневзвешенная по наиболее значимым и рисковым областям и сферам жизнедеятельности величина затрат для дополнительного спасения жизни каждого следующего индивидуума. Цена спасения жизни относится к разряду тех величин, которые принципиально не могут быть вычислены с большой точностью. Поэтому, учитывая значительную неопределенность данной величины, предлагается при расчетах брать несколько уровней значения ЦСЖ – нижнее, среднее и верхнее значения, соответственно 100 тыс., 600 тыс. и 1 млн. руб. на человека. Введенные нами количественные показатели ЦСЖ подтверждаются и установившейся в последние годы практикой выплаты семьям погибших в авариях, катастрофах и экстремальных ситуациях:

1. Гибель атомохода «Курск» в августе 2001 г. – выплаты семьям погибшим примерно по 700 тыс. руб. за человека.
2. Авария российского ТУ-154 в Германии (июль 2002 г.) – выплаты семьям погибших по 100 тыс. руб. за человека.
3. Семьям погибших солдат при защите границы России от проникновения банд с территории Грузии (август 2002 г.) выплаты по 100 тыс. руб. за человека.

Для сравнения, в США выплачены компенсации семьям погибших в результате террористического акта 11 сентября 2001 года в Нью-Йорке от 300 тыс. долларов до 3 миллионов долларов США.

Для определения риска ущерба от возможных травм различной тяжести вводится взвешивающий коэффициент P_k , сопоставляющий k -ю степень поражения (нетрудоспособность, серьезная травма, травмы средней и легкой тяжести) с летальным исходом.

При определении **риска материального ущерба (материального риска) $R(Y_M)$** в качестве критерия, определяющего ожидаемый уровень нанесенного ущерба материальному «объекту», рассматривается потеря им устойчивости к воздействию поражающих факторов. Под устойчивостью по-

нимается предельная величина поражающего фактора, до которой рассматриваемое оборудование, аппараты, здания и сооружения сохраняют ремонтпригодность

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

$$R_{\text{э}} = \frac{B}{\Pi} \cdot 100, \quad (3.18)$$

где $R_{\text{э}}$ - экономический риск, %; B - вред обществу от рассматриваемого вида деятельности; Π - польза.

В общем виде

$$B = Z_{\text{б}} + Y, \quad (3.19)$$

где $Z_{\text{б}}$ - затраты на достижение данного уровня безопасности; Y - ущерб, обусловленный недостаточной защищенностью человека и среды его обитания от опасностей.

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

$$\Pi = D - Z_{\text{б}} - B > 0 \quad \text{или} \quad \Pi = D - Z_{\text{п}} - Z_{\text{б}} - Y > 0, \quad (3.20)$$

где D - общий доход, получаемый от рассматриваемого вида деятельности; $Z_{\text{п}}$ - основные производственные затраты.

Формула экономически обоснованной безопасности жизнедеятельности имеет вид

$$Y < D - (Z_{\text{п}} + Z_{\text{б}}). \quad (3.21)$$

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

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

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т.е. можно говорить о снижении индивидуального, технического

или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

Индивидуальный риск $R(L)$ – частота летальных исходов, возникающих при реализации определенных опасностей в определенной точке пространства с учетом вероятности нахождения в ней индивидуум.

Социальный (коллективный) риск $R(N)$ – ожидаемое число летальных исходов в результате возможных аварий за определенный период времени. Для событий с тяжелыми последствиями от детерминированных эффектов консервативно принимается $R(N) = \sum R(L_i) \cdot N_i$, где N_i – число людей, в i -ой области пространства, подвергающихся воздействию поражающего фактора, превосходящего по величине граничный критерий воздействия (то есть поражающие воздействия рассматриваются в пределах КВП). Величина $R(N)$ интерпретируется как риск людских потерь.

Интегрированный риск $R\Sigma$ – ущерб взвешенный по вероятности наступления негативных событий, комплексный показатель прогнозируемого полного ущерба, нанесенного человеку, объектам экономики и экосистемам от всего спектра сценариев возможных аварий на потенциально опасном объекте. **Составляющие интегрированного риска:** риск ущерба от людских потерь (безвозвратных и санитарных); риск ущерба от нарушения нормального жизнеобеспечения населения; риск материального ущерба; риск экологического ущерба, измеренные в денежном эквиваленте (руб/год).

Таким образом, **интегрированный риск** – есть риск эксплуатации потенциально опасного объекта, определяемый комплексом последствий от реализации чрезмерной опасности.

Потенциальный риск $R(E)$ – пространственное и временное распределение частоты реализации поражающего воздействия.

Данная мера опасности выражает собой потенциал максимально возможного риска поражения реципиента (человека, материальных ценностей или экосистем) в рассматриваемой точке пространства, при условии, что вероятность нахождения реципиента риска в этой же точке равна единице. При реализации на потенциально опасном объекте возможных сценариев развития аварии, в данной точке пространства с разной частотой в течение года могут действовать поражающие факторы, обуславливающие формирование для реципиентов, находящихся с единичной вероятностью в этой же точке пространства, определенного суммарного потенциала риска по-

ражения. Таким образом, вокруг источника опасности, в пределах круга вероятного поражения, существует интегральное поле потенциального риска (с учетом наличия реципиентов).

Картированный риск – интегральное поле потенциального риска, выстроенное на карте изолиниями равного риска.

Изолинии строятся для некоторых фиксированных уровней потенциального риска, соответствующим численным значениям вероятности поражения реципиента в течение года: 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} и т.д. Такой подход позволяет выделить на топографической карте промышленного района зоны: чрезвычайно высокого риска ($>10^{-4}$ соб./год); высокого риска ($10^{-4} \div 10^{-5}$ соб./год); приемлемого риска ($10^{-5} \div 10^{-6}$ соб./год) и низкого риска ($<10^{-6}$ соб./год).

3.4.1. Оценка риска при обеспечении безопасности технических систем (В.А. Акимов и др., 2002)

С анализом риска тесно связан другой процесс — оценка риска.

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

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

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

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

Существуют четыре разных подхода к оценке риска.

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

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

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

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

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

Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска. Анализ неопределенностей — необходимая составная часть оценки риска. Как правило, основные источники неопределенностей — информация по надежности оборудования и человеческим ошибкам, а также допущения применяемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать величины риска, надо понимать неопределенности и их причины. Анализ неопределенности — это перевод неопределенности исходных па-

раметров и предложений, использованных при оценке риска, в неопределенность результатов.

Источники неопределенности должны по возможности идентифицироваться.

Основные параметры, к которым анализ является чувствительным, должны быть представлены в результатах.

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

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

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

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

Под этими терминами понимается совокупность мероприятий, направленных на снижение уровня технического риска, уменьшение потенциальных материальных потерь и других негативных последствий аварий. По сути дела, речь идет о предотвращении возникновения аварийных ситуаций на производстве и мерах по локализации негативных последствий в тех случаях, когда аварии произошли.

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

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

Взаимосвязь между оценкой риска и его управлением представлена на рис. 3.10.

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

Оценка риска служит основой для исследования и выработки мер управления риском в соответствии с алгоритмом действий (рис. 3.10).

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

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

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

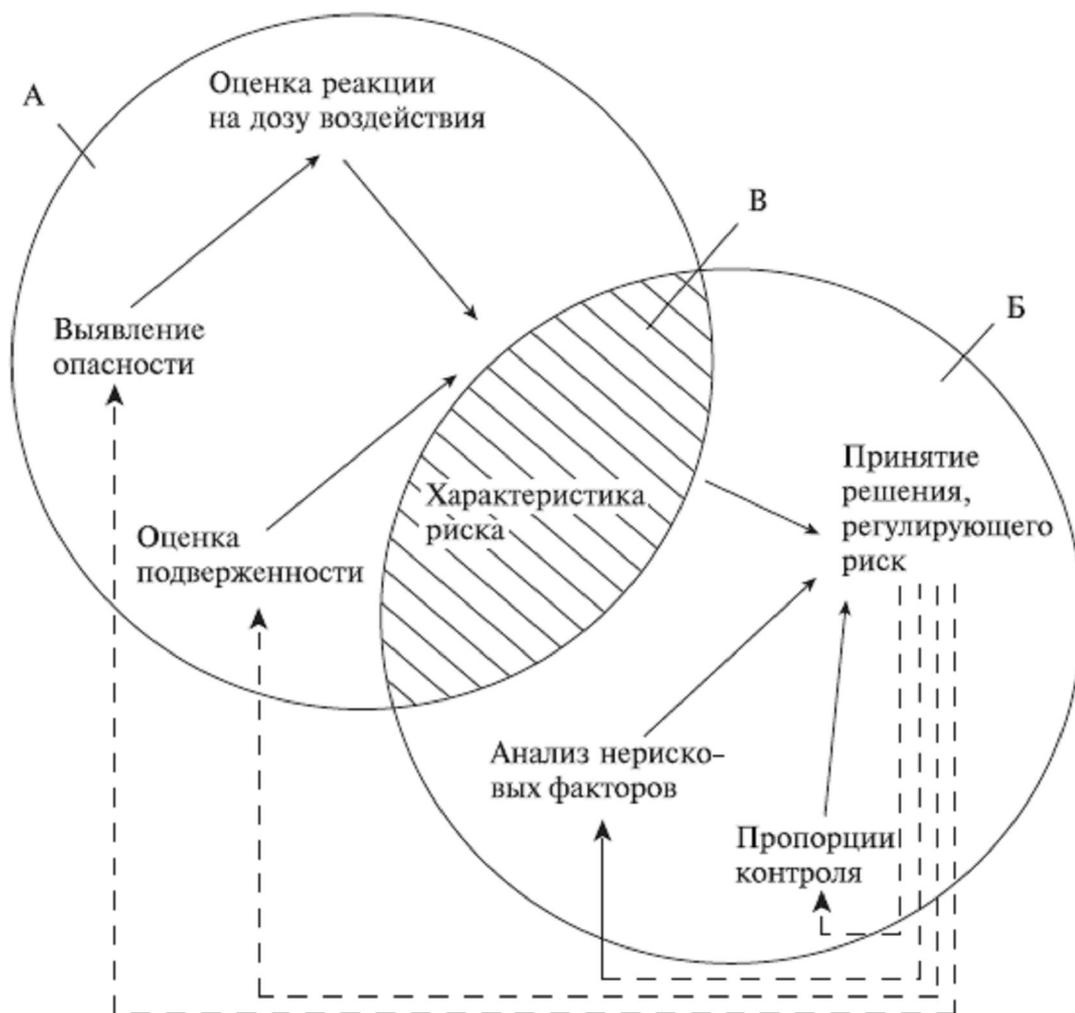


Рис. 3.10. Взаимосвязь между оценкой и управлением риском:
А — область оценки риска; *Б* — область управления риском;
В — область характеристики риска; непрерывные линии — прямые связи между элементами оценки и управления риском; пунктирные линии — обратные связи принятия решения с другими элементами оценки и управления риском

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

считается как мера «вероятности» возникновения события, что наиболее естественно интерпретировать как показатель, вводимый в рамках некоторой математической модели, в данном случае — вероятностной, поскольку рассматриваются случайные явления.

Например, можно характеризовать явление случайной величиной — обозначим ее z — числом случаев возникновения события (реализации явления) за определенный период времени T , например за год. Хорошо известно, что математическое ожидание M_z случайной величины z — это среднее (ожидаемое) число случаев возникновения события за год или частота возникновения события. Тогда в соответствии с принятой в математической статистике терминологией число событий (которое берется из статистических данных) — это выборка, отношение числа событий к длительности периода наблюдения — статистика, являющаяся, очевидно, несмещенной и состоятельной оценкой математического ожидания Mz , или частоты возникновения событий. Если считать распределение случайной величины z , например пуассоновским, т. е. если положить

$$P(z = k) = e^{-rT} (rT)^k / k! \quad (3.22)$$

где r — константа,

то возможно оценить условия, когда вводимый показатель можно считать вероятностью.

В самом деле, для пуассоновского распределения

$$M_z = rT. \quad (3.23)$$

С другой стороны, для пуассоновского распределения вероятность

того, что за время T случится не менее одного события, равна $1 - e^{-r \cdot T}$.

Поэтому только для очень малых частот возникновения события можно интерпретировать вводимый показатель как вероятность возникновения за время T хотя бы одного события.

Необходимо, однако, отметить, что вводимый таким способом показатель не является вероятностью в точном, математическом, смысле этого слова. Вероятностью (события в конечной схеме при классическом определении) называется отношение мощности множества элементарных исходов, составляющих это событие, к мощности всего множества элементарных исходов.

Вероятность события — это действительное число, лежащее в интервале 0—1. Так, например, при бросании обычной кости вероятность события «выпадение 7» равна нулю, вероятность события «выпадения 1 или 2» равна одной шестой, вероятность события «выпадение какого-нибудь числа между 1 и 6» равна единице. Таким образом, в рассмотренном случае те связи между событиями A и B , когда только при возникновении A случается B , можно интерпретировать как вероятность.

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

Поскольку реализация опасности явление случайное, риск опасности (как бы ни определять его — как частоту или вероятность) есть числовая характеристика соответствующей случайной величины, используемой для описания данной опасности. В качестве простейшего примера возможного формального подхода рассмотрим случайную величину s — длительность периода безаварийной работы промышленного предприятия, областью определения которой служит множество режимов эксплуатации за произвольное (возможно, бесконечное) время.

Оказывается возможным явно вычислить функцию распределения этой величины $F_s(t) = P(s \leq t)$, предположив ее независимость от предыстории функционирования промышленного предприятия (такое предположение является наиболее оптимистичным в отношении уровня безопасности). Хорошо известно, что существует единственное решение, удовлетворяющее сформулированному условию:

$$F_s(t) = 1 - e^{-qt} \text{ для } t > 0; \quad (3.24)$$

$$F_s(t) = 0 \text{ для } t < 0 \quad (3.25)$$

где $p > 0$ — постоянная.

Это так называемое показательное распределение. Математическое ожидание M_s случайной величины s есть $M_s = 1/p$, что позволяет интерпретировать параметр p как среднюю (ожидаемую) частоту аварий или риск аварий в смысле обсуждаемого определения.

Вероятность аварий p_T за период времени, не превосходящий T , определяется, очевидно, как

$$p_T = P(s \leq T) = 1 - e^{-qT} \quad (3.26)$$

Отметим, что всегда $p_T < p \cdot T$, поэтому неверно часто высказываемое утверждение, что для аварии, риск которой равен $1/T$, она обязательно случится за период T (вероятность такого события равна $1 - e^{-1}$, т. е. приблизительно 0,632). Более того, даже в этом простейшем случае показа-

тельного распределения было бы неверно утверждать, что вероятность аварии pT за период времени, меньший или равный T , определяется, как произведение частоты аварии p на этот период T . Имеет место лишь приблизительное равенство в случае малых рисков, т. е. редких аварий. Однако функциональная зависимость между вероятностью аварий и частотой ее возникновения (для фиксированного распределения) существует.

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

Мерой возможности наступления риска R служит вероятность его наступления P .

Отсюда следует:

$$R = Y * P. \quad (3.27)$$

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

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

$$R = P_1 * P_2 * P_3 * P_4. \quad (3.28)$$

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

P_1 — вероятность возникновения события или явления, обуславливающего формирование и действие опасных факторов;

P_2 — вероятность формирования определенных уровней физических полей, ударных нагрузок, полей концентрации вредных веществ, воздействующих на людей и другие объекты;

P_3 — вероятность того, что указанные уровни полей и нагрузок приведут к определенному ущербу;

P_4 — вероятность отказа средств защиты.

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

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

$$R_{MO} = \sum_{i=1}^n P_i Y_i, \quad (3.29)$$

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

P_i — вероятность возникновения опасного события i -го класса;

Y_i — величина ущерба при i -м событиях.

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

Понятие «риск» — атрибут научного аппарата многих технических, экономических, общественных и естественных наук. У каждого из них свой предмет, свой аспект, а потому в определении меры риска в безопасности выделяют социальные, профессиональные, экологические, техногенные, медико-биологические, военные и др. опасности.

Таким образом, **риск — мера вполне определенных опасностей**. Определяя риск, необходимо ответить на вопрос: риск чего? (Например, риск событий, связанных с эксплуатацией сложной технической системы — разгерметизацией оборудования, отказом средств предупреждения, ошибками человека и т. д.).

На рис. 3.11 дан обзор ситуаций с риском возникновения соответствующих нежелательных событий и приведены их измерения.

При угрозе материальным ценностям риск часто измеряют в денежном

выражении. Если различные последствия нежелательного события одинаковы или очень велики, то для сравнения достаточно рассматривать одни соответствующие вероятности. Наряду с этим может возникнуть угроза, которую нельзя выразить количественно, например, когда последствия события нельзя предусмотреть достаточно полно. Примером могут служить последствия выхода из строя прибора (установки и т. д.), используемого в различных областях народного хозяйства, которые поставщик оценить не может. В этом случае мерой риска остается принять вероятность превышения предела нагрузки на систему, где эксплуатировали прибор. При риске, связанном со здоровьем, последствия могут быть частично оценены количественно в таких категориях, как простой в работе или расходы на оплату подменяющего персонала и т. п., страховые выплаты. При риске, связанном с летальным исходом, количественные оценки последствий в большинстве случаев отсутствуют. Особые проблемы ставят случаи, когда опасность грозит и материальным ценностям, и людям, и окружающей

природе одновременно, и желательно меру такого риска оценить по нескольким компонентам.

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

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

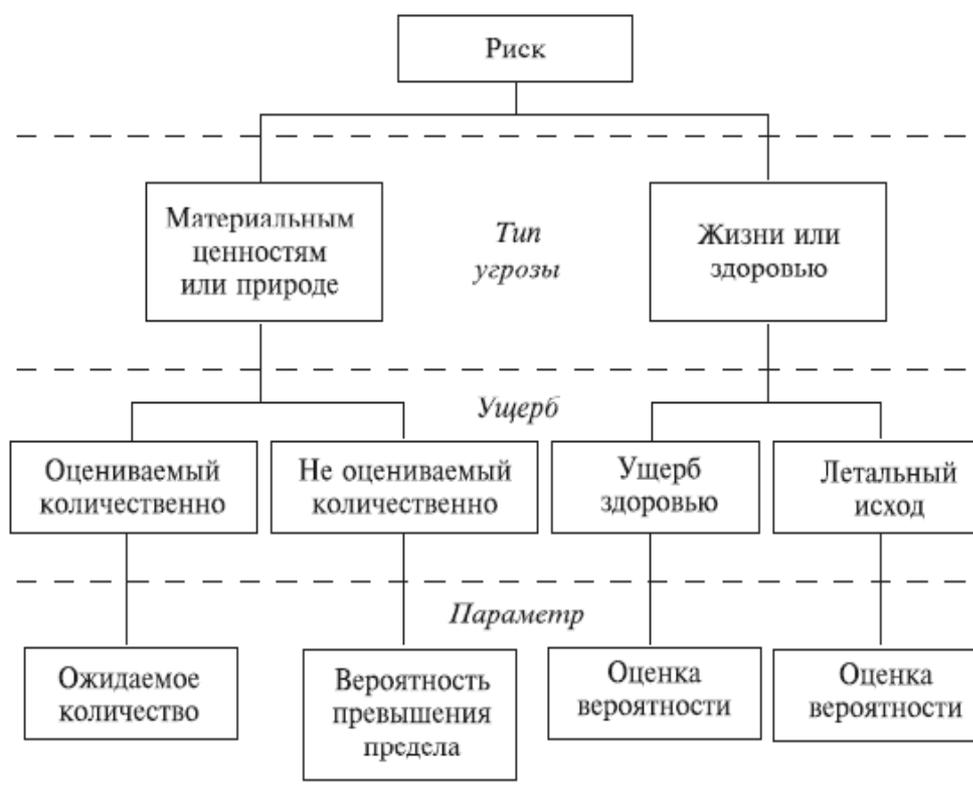


Рис. 3.11. Обзор ситуаций риска

3.4.2. Способы прогноза техногенного риска

(П.Г. Белов, А.И. Гражданкин)

Важное место в количественном прогнозе и оценке приемлемости техногенного риска, связанного с созданием, эксплуатацией и ликвидацией ОПО, принадлежит не только соответствующим методам прогноза и оценки, но и выбираемым количественным показателям. При этом обоснование состава таких показателей должно проводиться с учетом следующих основных требований:

- а) четкий физический смысл и универсальность,
- б) связь с качеством и продолжительностью функционирования ЧМС системы,
- в) учет всех существенных свойств ее основных компонентов,
- г) чувствительность к изменению параметров каждого из них,
- д) возможность оценки объективными методами,
- е) пригодность к использованию в качестве оптимизируемых параметров, ограничений и критериев оптимизации.

Принимая во внимание приведенные соображения, базовым показателем, наиболее полно характеризующим меру опасности ОПО и пригодным для эффективного риск-менеджмента на ОПО, может служить математическое ожидание $Mt [Y]$ величины социально-экономического ущерба техногенного характера от возможных в течение заданного времени t происшествий и непрерывных вредных выбросов. В качестве *других* показателей, необходимых для оценки результативности функционирования как системы обеспечения безопасности ОПО, так и менеджмента риска, могут быть следующие:

$Q(t)$ – вероятность возникновения хотя бы одного происшествия конкретного типа (авария, несчастный случай и др.) за время t ;

$Mt [Z]$ – ожидаемые средние задержки времени приостановки технологического процесса на ОПО вследствие возможных происшествий;

$Mt [S]$ – ожидаемые в это же время средние затраты на предупреждение и снижение тяжести происшествий и непрерывных вредных выбросов.

Учитывая массовый характер проведения однотипных процессов на ОПО, а также достаточно развитую систему сбора информации об аварийности и травматизме, использование выбранных показателей для апостериорной количественной оценки техногенного риска и принятия решения о степени его приемлемости, как правило, не вызывает принципиальных трудностей. Для этого достаточно регистрировать а) интенсивность и длительность проводимых процессов, б) расходы и трудозатраты на обеспечение безопасности, в) количество и тяжесть имевших место происшествий, и затем проводить расчеты по статистическому оцениванию выбранных показателей и сравнивать с их требуемыми или желаемыми значениями.

Значительно сложнее проводить *априорную* оценку предложенных показателей, поскольку это требует комплекса моделей, связывающих выбранные показатели не только с параметрами конкретных ЧМС систем, но и окружающей их внешней средой. Для преодоления этих трудностей иногда целесообразно оперировать понятием "средний ожидаемый ущерб" от техногенного происшествия конкретного типа за определенное время экс-

плуатации ОПО. С учетом подобных допущений, величина среднего ожидаемого ущерба людским, материальным и природным ресурсам за некоторый период времени t эксплуатации ОПО, может быть оценена по следующей формуле (по “источнику опасности”):

$$R_t = M_t[Y] = \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^k Q_{ab}^I Y_{ab}^I + \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^k Q_{ab}^{II} Y_{ab}^{II} + \sum_{v=1}^n Q_v Y_v \quad (3.30)$$

где: $a=1...m$ – число типов возможных техногенных происшествий: авария ($a=1$), несчастный случай ($a=2$), пожар ($a=3$) т.д. - форм причинения прямого и косвенного ущерба людским, материальным и природным ресурсам;

$b=1...k$ – число предполагаемых сценариев возникновения и развития различных типов происшествия;

Q_{ab}^I, Y_{ab}^I и Q_{ab}^{II}, Y_{ab}^{II} – вероятность возникновения за время t происшествия конкретного вида и размер обусловленного им прямого (I) и косвенного (II) ущерба соответственно;

$v=1...n$ – число видов непрерывных и/или систематических вредных энергетических (шум, вибрация, электромагнитный излучения...) и материальных (загрязняющие вещества, отходы ...) выбросов при эксплуатации ОПО;

Q_v, Y_v – вероятности появления за время t каждого типа непрерывных или систематических вредных выбросов и размеры возможного от них прямого и косвенного ущерба.

В основе другого способа приближенного прогноза среднего ожидаемого ущерба техногенного характера при эксплуатации ОПО лежит рассмотрение возможных зон поражения (объемов пространства или площадей поверхности), в пределах которых располагаются не защищенные людские, материальные и природные ресурсы. Это позволяет оценивать техногенный риск по следующей формуле (по «потенциальным жертвам»):

$$R_t = M_t[Y] = \sum_{l=1}^3 (Q_l^I \cdot \Pi_l^p \cdot F_l \cdot S_l) + \sum_{l=1}^3 (\Pi_l \cdot F_l \cdot S_l) + \sum_{v=1}^n Q_v Y_v + \sum_{l=1}^3 Q_l^{II} \cdot Y_l^{II} \quad (3.31)$$

где Q_l^I – вероятность причинения людским ($l=1$), материальным ($l=2$) и природным ($l=3$) ресурсам прямого (I) ущерба заданной степени тяжести за время t ;

Π_l^p, Π_l – соответственно площади/объемы зон вероятного и достоверного причинения ущерба людским, материальным и природным ресурсам по-

ражающими факторами внезапных и непрерывных выбросов энергии и/или вещества;

F_b , S_l – средние плотность и стоимость единицы каждого ресурса в зонах вероятного и достоверного причинения ущерба;

–вероятность возникновения косвенного (II) ущерба вследствие появления происшествия конкретного типа за время t и возможные средние размеры этого ущерба.

Для прогнозирования параметров каждой из этих двух формул необходимо использование совокупности дополнительных моделей и методов, которые с определенной условностью могут быть разделены на три довольно крупных класса.

1. Логико-вероятностные модели, интерпретирующие различные варианты возникновения и развития происшествий в виде диаграмм причинно-следственных связей типа «дерево» («дерево отказа», «дерево событий»), «граф» (поточковый либо состояний и переходов), «сеть» (стохастические структуры – К. Петри или GERT). После дальнейшей формализации они позволяют получать математические соотношения (структурные функции алгебры событий и расчетные вероятностные многочлены), удобные для проведения системного анализа процесса возникновения техногенного ущерба и прогноза техногенного риска (Белов, 2003).

2. Аналитические модели: а) параметрические формулы типа полуэмпирического уравнения М. Садовского для перепада давлений в атмосфере или гауссова модель рассеяния в ней вредных веществ; б) интегральные модели, базирующиеся на законах сохранения массы и энергии, и описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями; в) модели, построенные на представлении параметров состояния или энергообмена в их оригинальном виде и реализуемые системами дифференциальных уравнений в частных производных.

3. Методы логико-лингвистического, имитационного, статистического и численного моделирования, основанные на использовании случайных (в том числе, нечетко определенных) распределений параметров совокупности различных моделей и учете непрерывно меняющихся факторов ЧМС систем и окружающей их среды.

С точки зрения предназначения или области применения, вышеперечисленные модели и методы могут быть распределены по пяти основным этапам причинения техногенного ущерба: 1) возникновение и развитие причинной цепи предпосылок происшествия, необходимых и достаточных для начала неконтролируемого выброса энергии и/или вещества; 2) истечение, 3) распространение и 4) трансформация соответствующих потоков

энергии и/или вещества в окружающей среде, 5) воздействие поражающих факторов, обусловленных неконтролируемым выбросом энергии и/или вещества, на незащищенные людские, материальные и природные ресурсы.

Наибольший практический интерес для прогноза риска аварий на ОПО представляют модели: а) образования причинной цепи предпосылок аварии, б) источника выброса опасного вещества, в) истечения газообразных, жидких или двухфазных опасных веществ; г) распространения энергии и массы в несущей среде или растекание и межсредный перенос опасного вещества; д) вскипания сжиженного газа или перегретой жидкости, е) физико-химического превращения опасных веществ с интенсивным энерговыделением и образованием полей поражающих факторов; ж) реципиентов поражающих факторов; з) поражения вида «доза-эффект».

3.4.2. Оценка производственных рисков

(Википедия)

Методика оценки

Одним из критериев эффективности действующей системы управления охраной здоровья персонала и производственной безопасности (ЗПиПБ) является ее соответствие требованиям спецификации OHSAS 18001-1999 и российского ГОСТ Р 12.0.006-2002 «ССБТ. Общие требования к управлению охраной труда в организации».

Опасные и вредные факторы, опасные работы

Опасные и вредные факторы на объекте (рабочем месте) выделяются в соответствии с требованиями ГОСТ 12.0.003-74 «Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» и стандарта ИСО 17776-2000 «Нефтяная и газовая промышленность. Морские установки. Руководящие указания по средствам и методам идентификации опасностей и оценки рисков».

Основными опасными и вредными производственными факторами на опасных производственных объектах нефтегазодобычи являются:

участие в производственном процессе или возможность образования при проведении процесса опасных химических веществ (вредных, пожаровзрывоопасных);

- высокие давления;
- высокие температуры;
- движущиеся части оборудования и механизмов (включая вращающиеся и вибрирующие части);
- опасные значения электрического напряжения;

- шум, вибрация и др.

При определении степени риска травматизма рассматриваются все стадии работ: в процессе подготовки, на стадиях выполнения и завершения.

Одним из критериев эффективности действующей системы управления охраной здоровья персонала и производственной безопасности (ЗПиПБ) является ее соответствие требованиям спецификации OHSAS 18001-1999 и российского ГОСТ Р 12.0.006-2002 "ССБТ. Общие требования к управлению охраной труда в организации".

Указанные документы регламентируют лишь общие требования к создаваемым системам охраны труда и производственной безопасности в организациях, оставляя право выбора конкретных и наиболее удобных путей их реализации за коллективами, внедряющими эти системы.

Основой системы управления охраной ЗПиПБ являются корректное проведение идентификации опасностей, оценка риска и выбор эффективных способов его контроля. В редакции OHSAS 18001-2007 эти требования сформулированы следующим образом.

Организация должна установить, внедрить и соблюдать процедуры для постоянной идентификации опасностей, оценки риска и выбора необходимых способов контроля.

Процедуры идентификации опасностей и оценки риска должны учитывать:

- обычные и особые режимы деятельности;
- деятельность всех лиц, имеющих доступ к рабочему месту (включая субподрядчиков и посетителей);
- поведенческие реакции, возможности и другие человеческие факторы;
- идентифицированные опасности, возникающие вне рабочей среды, которые могут негативно повлиять на здоровье и безопасность лиц на рабочем месте, находящемся под контролем организации;
- опасности, создаваемые вблизи рабочего места, связанные с профессиональной деятельностью, находящейся под контролем организации (подобные опасности могут рассматриваться и в экологическом аспекте);
- инфраструктуру, оборудование и материалы на рабочем месте, предоставляемые данной или другими организациями;
- произошедшие или предполагаемые изменения в организации, сфере ее деятельности или материалах;

- модификации в системе менеджмента ЗПиПБ, включая временные изменения, и их влияние на операции, процессы и хозяйственную деятельность;
- любые применимые законодательные обязательства, относящиеся к оценке риска и внедрению необходимых мер контроля;
- конфигурацию рабочих мест, процессов, механизмов, оборудования и агрегатов, операционных процедур и организации работы, включая их адаптацию к возможностям человека.

Методология организации для идентификации опасностей и оценки риска должна:

- определяться с учетом масштаба, характера и длительности процессов, обеспечивая скорее предупредительный, чем реактивный подход;
- обеспечивать идентификацию, установление приоритетов и документирование рисков, а также внедрение соответствующих видов контроля.

Для управления изменениями организация должна заранее, до их введения, идентифицировать опасности и риски ЗПиПБ, связанные с переменами в организации, системе менеджмента ЗПиПБ либо ее деятельности.

Организация должна гарантировать, что результаты таких оценок учтены при разработке методов контроля.

При определении методов контроля или рассмотрении изменений в существующих методах следует стремиться к снижению рисков в соответствии со следующей иерархией:

- устранение риска;
- замена;
- инженерные средства контроля;
- сигнализация / предупредительные знаки и/или административный контроль;
- средства индивидуальной защиты.

Организациям, внедряющим системы менеджмента охраны здоровья персонала и безопасности труда, следует выбирать наиболее продуктивно "работающие" методики и подходы для выполнения требований соответствующих стандартов и контроля за эффективностью их выполнения.

Организация должна установить риски, которые могут быть признаны неприемлемыми, а также которые будут использованы как база при разработке целей и задач в области ЗПиПБ и соответствующих программ улучшения условий труда.

Наиболее корректно определять риски можно с помощью методологии количественного анализа риска, нормативно используемой при разра-

ботке, например, деклараций безопасности (ДБ) опасных производственных объектов, паспортов безопасности опасных объектов, планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций на химико-технологических объектах (в расчетно-пояснительных записках по анализу риска), планов локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (в соответствии с приказом МЧС России от 28.12.04 № 621). Удовлетворительной можно считать оценку риска только от воздействия барического, термического и токсического поражающих факторов.

Одним из примеров реализации требований безопасности является ***Методика идентификации опасности и оценки риска травматизма, профзаболеваний и нарушений условий труда на рабочих местах (при проведении рабочих операций), аварий и инцидентов.***

Методика обеспечивает:

- полуколичественный подход к оценке и управлению риском (по сравнению с часто практикуемым способом фиксации результатов аттестации рабочих мест по условиям труда: аттестован, не аттестован, условно аттестован – последняя категория имеет явно субъективный подтекст);
- возможность вероятностной оценки, учета не только опасных и вредных факторов производственной среды, но и предыстории травматизма (профзаболеваний) на предприятии;
- возможность принятия аргументированного решения по выбору корректирующих и предупреждающих мероприятий, определению количественно измеряемых целей и задач по охране труда.

Внедрение (после адаптации) Методики на предприятиях позволит снизить уровень травматизма и профзаболеваний, облегчит внедрение и сертификацию системы управления промышленной безопасностью и охраной труда.

Основные положения Методики применительно к предприятиям нефтегазодобычи приведены ниже.

Опасные и вредные факторы, опасные работы

Опасные и вредные факторы на объекте (рабочем месте) выделяются в соответствии с требованиями ГОСТ 12.0.003-74 «Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

Степень опасности

При анализе рисков используются типовые уровни последствий и связанные с ними определения (табл. 3.6).

Пример.

Основными опасными и вредными производственными факторами на опасных производственных объектах нефтегазодобычи являются:

- участие в производственном процессе или возможность образования при проведении процесса опасных химических веществ (вредных, пожаровзрывоопасных);
- высокие давления;
- высокие температуры;
- движущиеся части оборудования и механизмов (включая вращающиеся и вибрирующие части);
- опасные значения электрического напряжения;
- шум, вибрация и др.
- При определении степени риска травматизма рассматриваются все стадии работ: в процессе подготовки, на стадиях выполнения и завершения.

Таблица 3.6

Степень опасности	Определение	
	для травмоопасности (по видам работ)	для нарушений условий труда (по рабочим местам, на промышленной площадке в целом)
1	2	3
Угрожающая	Отмечены случаи гибели при проведении подобных работ на предпри-	Зафиксированы случаи профзаболеваний, связанных с рассматриваемым

	ятии либо имеется потенциал нанесения травмы такой степени тяжести	фактором, приведших к инвалидности (потере работоспособности по данной специальности)
Значительная	На предприятии при проведении подобных работ отмечены случаи травм, приводящих к потере трудоспособности по данной специальности на срок более 90 суток, либо имеется потенциал нанесения травмы такой степени тяжести	Зафиксированы случаи профзаболеваний, связанных с рассматриваемым фактором
Критическая	На предприятии при проведении подобных работ отмечены случаи травм средней тяжести (потеря трудоспособности от 1 до 90 суток) либо имеется потенциал нанесения травмы такой степени тяжести	Превышение величины вредного производственного фактора значения ПДК в рабочей зоне или значения, указанного в соответствующих санитарных нормах и правилах и государственных стандартах; невозможность ее определения с достаточной степенью точности и периодичности
Терпимая	На предприятии при проведении подобных работ отмечены случаи легких травм (диапазон: необходима только первая помощь – потеря трудоспособности в течение суток) либо имеется потенциал нанесения травмы такой степени тяжести	Превышение 0,1 ПДК в рабочей зоне или значения, указанного в соответствующих санитарных нормах и правилах и государственных стандартах

Матрица рисков

Риск нарушений условий труда (степень травмоопасности, опасности профзаболеваний) может быть классифицирован с использованием матрицы рисков (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Условия реализации опасности	Классы риска при степени опасности			
	терпимой	критической	значительной	угрожающей
В случае аварии (инцидента)	3	3	2	2
При выполнении ремонтных, пусконаладочных работ	3	2	2	2
При обслуживании оборудования	2	2	2	1
Постоянно на рабочем месте (при вы-	2	2	1	1

полнении данного вида работ)				
------------------------------	--	--	--	--

Риск аварий (инцидентов) на опасном производственном объекте может быть классифицирован на основе матрицы рисков по трем классам с учетом данных, представленных в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Частота реализации аварии (инцидента), случаев/год	Класс риска при потенциальном ущербе, МРОТ*				
	<200	200- 2000	2000- 20000	20000- 200000	>200000
10-5-10-6	3	3	3	3	2
10-4-10-5	3	3	3	2	2
10-3-10-4	3	3	2	2	
10-2-10-3	3	2	2	1	
10-1-10-2	2	2	1	1	
1-10-1	2	1	1	1	
>1	1	1	1	1	

* МРОТ – минимальный размер оплаты труда.

Методика позволяет выделять следующие классы рисков:

- **класс 1** – недопустимый риск (должен быть снижен перед выполнением или продолжением выполнения работы, использованием рабочего места, дальнейшей эксплуатацией опасного производственного объекта);
- **класс 2** – неприемлемый риск (необходима оценка целесообразности мер по снижению риска);
- **класс 3** – допустимый риск.

Опыт работы показывает, что Методика хорошо вписывается в современную систему технического регулирования и позволяет предприятиям оценивать риски травматизма, аварий и инцидентов.

Система ЗПиПБ является частью общей системы управления предприятием и влияет на эффективность его функционирования (чем меньше внеплановых потерь, связанных с авариями и инцидентами, тем эффективнее предприятие при прочих равных условиях). В общем случае критерий

эффективного управления рисками, связанными с внеплановыми потерями, можно выразить следующим образом: **в первую очередь вкладывать средства надо в то мероприятие, которое на единицу вложенных средств позволяет получить максимум снижения риска**, а после реализации данного мероприятия надо снова оценить и выбрать следующее наиболее эффективное мероприятие. Программу улучшения ЗПиПБ целесообразно реализовывать по указанному алгоритму.

Алгоритм оценки

В цивилизованном мире давно установлено, что для минимизации затрат на охрану труда и увеличения при этом эффективности производства необходима система управления охраной труда (СУОТ), являющаяся частью общей системы управления организацией.

Для решения задач по обеспечению здоровья и безопасности в процессе трудовой деятельности согласно ГОСТ 12.0.230-2007 «ССБТ. Системы управления охраной труда. Общие требования»* рекомендуется использовать СУОТ, которая должна обеспечивать управление рисками в области, связанной с деятельностью организации, соответствовать политике организации и стремительно совершенствующемуся на всех уровнях менеджменту управления.

Системный подход в области управления безопасностью и здоровьем предполагает идентификацию, оценку и устранение или снижение риска на каждом рабочем месте и непрерывное совершенствование СУОТ. Производя оценку риска, необходимо четко выделить объект защиты. Риск может быть профессиональным (объект защиты — работник), техническим (объект защиты — оборудование, сооружения), экологическим (объект защиты — окружающая среда).

Риск имеется практически на каждом рабочем месте. Например, на рабочем месте имеется опасность — движущаяся конвейерная лента или вращающийся элемент оборудования. Выясняем возможные причины реализации опасности в нежелательные события, каковыми обычно являются:

- отсутствие ограждения, экранов, блокировок, исключающих случайный и преднамеренный контакт работников с источником риска;
- несоответствие предохранительных, защитных устройств;
- недостаточная скорость срабатывания механизмов защиты;
- неудобное расположение и неправильная окраска кнопок управления;
- плохая освещенность;
- несоответствующий микроклимат;
- наличие вредных химических веществ, аэрозолей и пыли;

- высокая скорость движения конвейера;
- расположение оборудования вблизи других рабочих мест или маршрута движения работников;
- несоответствующие средства индивидуальной защиты (далее — СИЗ);
- другие возможные причины и несоответствия.

Многообразие видов деятельности организаций вызывает необходимость разработки четкого алгоритма анализа профессионального риска, имеющего единую основу с оценкой других технических рисков. Всемирная организация здравоохранения определяет профессиональный риск как математическую концепцию, отражающую ожидаемую тяжесть и частоту неблагоприятных реакций организма человека на данную экспозицию вредного фактора производственной среды.

С учетом этого можно выработать алгоритм оценки профессионального риска, в результате которого риск признается приемлемым или неприемлемым, остаточный риск приемлемым.

Согласно ст. 212 ТК РФ работодатель обязан информировать работников о риске повреждения здоровья. Именно процедуры идентификации риска, основанные на глубоких знаниях технологии работ и процессов, позволяют выявить источники риска, все виды опасности на рабочем месте и обеспечить последующий качественный анализ воздействия опасных и вредных производственных факторов, источником которых являются производственные процессы. Процедура идентификации риска заканчивается составлением перечня и кратким описанием опасностей с учетом того, что источником опасности может быть как объект, так и деятельность. В новой версии OHSAS 18001-2007 поведенческие, личностные и другие человеческие факторы также включены в качестве элементов, рассматриваемых при идентификации опасностей и выработке способов контроля.

Алгоритм анализа профессионального риска для защиты персонала от несчастных случаев и профессиональных заболеваний на рабочем месте может быть представлен следующим образом:

- идентификация опасностей (выявление вредных и опасных факторов рабочей среды и трудового процесса);
- определение возможных причин, приводящих к нежелательным событиям;
- оценка риска (вероятность осуществления риска, определение масштаба последствий нежелательного события с учетом возможной тяжести инцидента и вреда здоровью человека, вывод о приемлемости или неприемлемости риска);

- выбор и оценка средств защиты от каждого вида опасности;
- оценка остаточного риска после внедрения системы защиты;
- оценка системы защиты жизни и здоровья персонала в целом в соответствии с классом условий труда

3.5. Критерии приемлемого риска в техногенной деятельности (Ветошкин А.Г., 2003)

Человеческое сообщество пришло к пониманию невозможности создания «абсолютной безопасности» реальной действительности, и следует стремиться к достижению такого уровня риска от опасных факторов, который можно рассматривать как «приемлемый».

Его приемлемость должна быть обоснована исходя из экономических и социальных соображений. Это означает, что уровень риска от факторов опасности, обусловленных хозяйственной деятельностью, является «приемлемым», если его величина (вероятность реализации или возможный ущерб) настолько незначительна, что ради получаемой при этом выгоды в виде материальных и социальных благ, человек или общество в целом готово пойти на риск.

Особую роль для общества играет установление приемлемого риска. В зарубежной практике при решении производственных задач считается приемлемым значение индивидуального риска $1 \cdot 10^{-8}$.

Индивидуальный риск выше $1 \cdot 10^{-6}$ – неприемлем.

Однако эти значения – отправные данные для обоснования пороговых значений риска. Норматива допустимого социального риска не существует. Косвенно социальный риск определяется опасностью производственных объектов (предприятий). Оценка опасности объектов предполагает анализ опасных факторов производства, установление численных значений вероятности возникновения опасных ситуаций, анализ их развития и прогноз возможного числа погибших людей.

Принятие риска в качестве одного из показателей безопасности ставит несколько важных задач нормирования, таких как обоснование критериальных значений риска, контроля риска, способы верификации расчетных методик.

Среди подходов, предложенных для обоснования критериальных значений риска следует отметить метод экономического анализа безопасности, основанный на учете затрат на обеспечение безопасности и потерь от возможных аварий.

Концепция нормирования безопасности предлагает задание риска следующим образом:

– абсолютная безопасность не может быть обеспечена, объект может быть только относительно безопасен;

- требования к уровню безопасности формируются на основе «приемлемого риска», связаны с социально-экономическим состоянием общества и являются производными этого состояния;

- определение риска осуществляется путем выявления различных факторов, влияющих на безопасность, и их количественной оценки.

Другие аспекты нормирования безопасности:

- риск не должен превышать уровня, достигнутого для сложных технических объектов с учетом природных воздействий;

- риск должен быть снижен настолько, насколько это практически достижимо в рамках соответствующих ограничений;

- не должно быть составляющих риска, резко превышающих другие (аналог принципа равнонадежности, применяемого при обеспечении надежности изделий).

Поэтому, оценивая приемлемость различных уровней экономического риска на первом этапе, можно ограничиться рассмотрением риска лишь тех вредных последствий, которые, в конечном счете, приводят к смертельным исходам, поскольку для этого показателя достаточно надежные статистические данные. Тогда, например, понятие «экологический риск» может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба, выраженного в числе смертельных исходов от воздействия вредного экологического фактора за определенный интервал времени к нормированной величине интенсивности этого фактора.

Таким образом, главное внимание при определении технического, экологического и социального риска должно быть направлено на анализ соотношения возможного экономического ущерба, вредных социальных и экологических последствий, заканчивающихся смертельными исходами, и количественной оценки как суммарного техногенного, вредного социального и экологического воздействия, так и его компонентов.

Общественная приемлемость риска связана с различными видами деятельности и определяется экономическими, социальными и психологическими факторами.

Приемлемый риск - это такой низкий уровень смертности, травматизма или инвалидности людей, который не влияет на экономические показатели предприятия, отрасли экономики или государства.

В общем случае под приемлемым риском понимается риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из экономических и социальных соображений.

Необходимость формирования концепции приемлемого (допустимого) риска обусловлена невозможностью создания абсолютно безопасной деятельности (технологического процесса).

Экономические возможности повышения безопасности технических систем не безграничны. Так, на производстве, затрачивая чрезмерные средства на повышение безопасности технических систем, можно нанести ущерб социальной сфере производства (сокращение затрат на приобретение спецодежды, медицинское обслуживание и др.).

Пример определения приемлемого риска представлен на рис. 3.12.

При увеличении затрат на совершенствование оборудования технический риск снижается, но растет социальный. Суммарный риск имеет минимум при определенном соотношении между инвестициями в техническую и социальную сферу. Это обстоятельство надо учитывать при выборе приемлемого риска. Подход к оценке приемлемого риска очень широк.

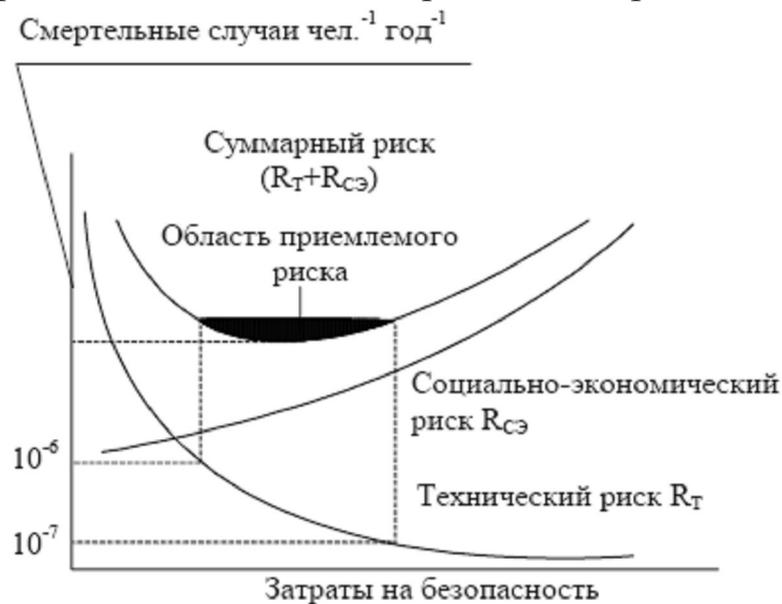


Рис.3.12. Определение приемлемого риска

При определении социально приемлемого риска обычно используют данные о естественной смертности людей.

В качестве реперного значения **абсолютного риска** принимают величину летальных исходов (ЛИ):

$$RA = 10^{-4} \text{ ЛИ}/(\text{чел.год}). \quad (3.32)$$

В качестве реперного значения *допустимого (приемлемого) риска* при наличии отдельно взятого источника опасности принимают:

$$RD = 10^{-5} \text{ ЛИ/}(чел.год); \quad (3.33)$$

$$RD = 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ НС/}(чел.год), \quad (3.34)$$

где НС – случаи нетрудоспособности.

Для населения величина дополнительного риска, вызванного техногенными причинами, не должна превышать реперное значение абсолютно-го риска:

$$R \leq RA. \quad (3.35)$$

Для отдельно взятого источника опасности, учитывая, что индивидуальный риск зависит от расстояния $R = R(r)$, условие безопасности можно записать в виде:

$$R(r) \leq RD. \quad (3.36)$$

В настоящее время по международной договоренности принято считать, что действие техногенных опасностей (технический риск) должно находиться в пределах от $10^{-7} \dots 10^{-6}$ (смертельных случаев*чел⁻¹*год⁻¹), а величина 10^{-6} является максимально приемлемым уровнем индивидуального риска. В национальных правилах эта величина используется для оценки пожарной безопасности и радиационной безопасности.

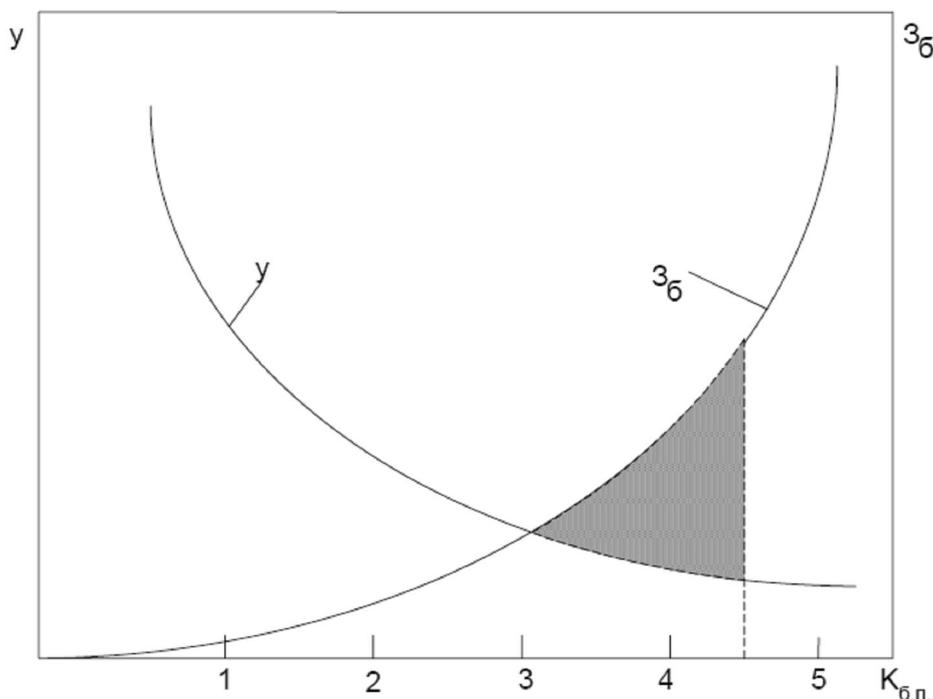


Рис. 3.13. Соотношение ущерба и затрат на безопасность:
 $У$ -ущерб; $Зб$ -затраты на безопасность; $К.б.п.$ – критерий безопасности (заштрихованная площадь – область приемлемых)

значений У и Зб)

Процесс управления риском состоит в оценке факторов риска.

Возможны три варианта принимаемых решений:

- риск приемлем полностью;
- риск приемлем частично;
- риск неприемлем полностью.

В настоящее время уровень пренебрежимого предела риска обычно устанавливаются как 1% от максимально допустимого.

В двух последних случаях необходимо установить пропорции контроля, что входит в задачу третьего этапа процедуры управления риском.

Третий этап – определение пропорции контроля – заключается в выборе одной из типовых мер, способствующей уменьшению (в первом и во втором случае) или устранению (в третьем случае) риска.

Четвертый этап – принятие регулирующего решения – определение нормативных актов (законов, постановлений, инструкций) и их положений, соответствующих реализации той “типовой” меры, которая была установлена на предшествующей стадии. Данный элемент, завершая процесс управления риском, одновременно увязывает все его стадии, а также стадии оценки риска в единый процесс принятия решений, в единую цепочку риска.

ГЛАВА IV

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Методы анализа опасности ТС

Основные задачи этапа идентификации опасностей - выявление безопасности объекта на основе информации, данных экспертизы и опыта работы подобных систем, а также четкое описание всех источников опасностей и путей (сценариев) их реализации.

Опасности могут проявляться в различной форме (взрыв, пожар, разлив, выброс) и в различных пространственно-временных масштабах (локальные, глобальные, мгновенные, отдаленные и пр.).

Методы определения потенциальных опасностей можно разделить на:

1. Инженерные методы с использованием статистики, когда производится расчет частот, проводится вероятностный анализ безопасности и построение деревьев опасности.
2. Модельные методы: основаны на построении моделей воздействия опасных и вредных факторов на отдельного человека, на профессиональные и социальные группы населения.
3. Экспертные методы: включают определение вероятностей различных событий на основе опроса опытных специалистов-экспертов.
4. Социологические методы, которые основаны на опросе населения.

На стадии идентификации опасностей используется один или несколько из перечисленных ниже методов анализа опасности:

- «что будет, если..?»;
- контрольный (проверочный) лист;
- анализ опасности и работоспособности;
- анализ видов и последствий отказов;
- анализ «дерева отказов»;
- анализ «дерева событий»;
- соответствующие эквивалентные методы.

Результатом идентификации опасностей являются:

- перечень нежелательных событий;
- описание источников опасности, факторов опасности, условий возникновения и развития нежелательных событий (например, сценариев возможных аварий);

• предварительные оценки опасности (например, при идентификации опасностей, при необходимости, могут быть представлены показатели опасности применяемых веществ, оценки последствий для отдельных сценариев аварий и т.п.).

Идентификация опасностей завершается также выбором дальнейшего направления деятельности. В качестве вариантов дальнейших действий может быть:

- решение прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей или достаточности полученных предварительных оценок;
- решение о проведении более детального анализа и оценки опасности;
- выработка предварительных рекомендаций по уменьшению опасностей.

Рекомендации по выбору методов идентификации опасности для анализа риска для различных видов деятельности и этапов функционирования опасного производственного объекта представлены в табл 4.1.

Идентификация опасностей и областей уязвимости имеет фундаментальную важность в управлении безопасностью. Однако, идентификация опасностей - не простой вопрос. Во многих отношениях она становится все более трудной, поскольку возрастает сложность технологий. В управлении безопасностью имеется тенденция все более и более зависеть от систем управления, а в них не всегда легко обнаружить уязвимые места. Физические опасности также уже не видны только при поверхностном рассмотрении. С другой стороны, в настоящее время имеется доступный арсенал методов идентификации опасности, которые могут использоваться для решения этих проблем.

Таблица 4.1

Выбор методов идентификации опасности

Метод	Вид деятельности				
	Пред- проектные работы	Проекти- рование	Ввод или вывод из эксплуата- ции	Эксплуа- тация	Реконст- рукция
Анализ «Что бу- дет, если..?»	o	+	++	++	+
Метод провероч- ного листа	o	+	+	++	+
Анализ опасности и работоспособно- сти	o	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отка- зов	o	++	+	+	++
Анализ «деревьев отказов и собы- тий»	o	++	+	+	++
Количественный анализ риска	++	++	o	+	++

В таблице 4.1. приняты следующие обозначения:

o — наименее подходящий метод анализа;

+ — рекомендуемый метод;

Схема предварительного анализа опасностей должна включать следующие этапы:

- идентификация носителей аварийной опасности;
- анализ возможных причин от инициирующего события до инцидента;
- анализ возможных путей развития аварийной ситуации;
- составление сценариев гипотетических аварий на основе выбранных наиболее опасных инцидентов.

Основные факторы токсической опасности, которые необходимо учитывать на стадии идентификации опасности объектов химико-технологических опасных объектов:

- опасные вещества и материалы;
- опасные элементы оборудования;
- опасные действия и процедуры.

Используемые для идентификации опасностей технические приемы могут быть представлены следующими тремя категориями, согласно установившейся мировой практике.

1. Сравнительные методы:

- регламентные проверки;
- ревизия безопасности;
- предварительный анализ опасностей.

2. Основные методы:

- анализ «что, если?»;
- исследования риска эксплуатации (АОР);
- анализ состояний отказов и их воздействия (АВПО).

3. Методы логических диаграмм:

- анализ деревьев отказов (АДО) и деревьев событий (АДС);
- причинно-следственный анализ;
- анализ надежности человеческого фактора.

Регламентные проверки используются для определения опасностей и выявления возможного несоответствия стандартным процедурам.

Перечень проверок, естественно, ограничивается опытом специалистов, которые их выполняют. Качество результатов этой процедуры зависит от уровня понимания и знания ими самой системы или объекта и тех физических процессов, которые протекают в его элементах. По итогам каждой проверки принимается решение по типу «да — нет» о согласии со стандартными процедурами.

Аудит безопасности выполняется группой квалифицированных специалистов. Дается общая оценка безопасности объекта с учетом производственно-технических условий и организационных мероприятий.

Детально ревизуются все потенциально опасные производственные процессы, оборудование, соответствующие системы безопасности; проводятся беседы с персоналом всех уровней от операторов и инженеров до администрации.

Изучаются данные обо всех несчастных случаях, отказах оборудования, рассматриваются противоаварийные планы. По результатам ревизии составляется итоговый отчет.

Предварительный анализ опасностей (ПАО) - выявление источника опасностей, определение системы или событий, которые могут вызывать опасные состояния, характеристика опасностей в соответствии с вызываемыми ими последствиями.

Предварительный анализ опасностей осуществляют в следующем порядке:

- изучают технические характеристики объекта, системы, процесса, используемые энергетические источники, рабочие среды, материалы и устанавливают их повреждающие свойства;
- устанавливают нормативно-техническую документацию, действие которой распространяется на данный технический объект, систему, процесс;
- проверяют существующую техническую документацию на ее соответствие нормам и правилам безопасности;
- составляют перечень опасностей, в котором указывают идентифицированные источники опасностей, повреждающие факторы, потенциальные аварии, выявленные недостатки.

В целом ПАО представляет собой первую попытку выявить оборудование технической системы (в ее начальном варианте) и отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Этот анализ выполняется на начальном этапе разработки системы. Результат имеет качественный характер. Численные оценки при проведении анализа не предполагаются.

Детальный анализ возможных событий обычно проводится с помощью дерева отказов, после того как система полностью определена.

Анализ опасности и работоспособности (АОР) – подразумевает регулярное обследование объекта, включая трубопроводы и системы контроля и управления, с целью выявления возможных отклонений от нормативов. Помимо выявления опасности данный метод является инструмен-

том управления безопасностью, поскольку определяются необходимые меры для ликвидации нарушений и отклонений.

Анализ «что будет, если?». Главной целью метода является тщательное рассмотрение результатов возможных нештатных событий, которые могут иметь нежелательные последствия и развиваться в аварию. Детально изучаются возможные отклонения от проектных решений в конструкции, элементах оборудования, параметрах технологических процессов. При этом, помимо выявления опасностей, возможна выработка предложений по уменьшению риска.

Анализ видов и последствий отказов (АВПО) – качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе и имеющий характер прогноза. АПО является анализом индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последовательного рассмотрения одного элемента за другим, анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляются их результирующие воздействия на систему. Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов позволяют определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом.

АПО осуществляют в следующем порядке:

- техническую систему (объект) подразделяют на компоненты;
- для каждого компонента выявляют возможные отказы;
- изучают потенциальные аварии, которые могут вызвать отказы на исследуемом объекте;
- отказы ранжируют по опасностям и разрабатывают предупредительные меры.

Метод не применяется к анализу возможной комбинации и наложения отказов отдельных элементов системы, ведущей к аварии.

Метод дает лишь качественный результат, представляющий собой перечень элементов оборудования с видами отказов и их последствиями. Этим методом можно оценить опасный потенциал любого технического объекта. По результатам анализов отказов могут быть собраны данные о частоте отказов, необходимые для количественной оценки уровня опасности рассматриваемого объекта.

Анализ опасностей с помощью «дерева причин» потенциальной аварии (АОДП) позволяет выявить комбинации отказов (неполадок) оборудования, ошибок персонала и внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к основному событию (аварийной ситуации).

АОДП выполняют в следующем порядке:

- выбирают потенциальное событие-аварию или отказ, который может привести к аварии;
- выявляют все факторы, которые могут привести к заданной аварии, включая все потенциальные инциденты;
- по результатам этого анализа строят ориентированный граф-«дерево», вершина (корень) которого занумерована потенциальной аварией.

Проведение анализа возможно только после детального изучения рабочих функций всех компонентов рассматриваемой технической системы.

На работу системы оказывает влияние человеческий фактор, например, возможность совершения оператором ошибки. Поэтому желательно все потенциальные инциденты - отказы операторов вводить в содержание дерева отказов. Дерево отражает статический характер событий. Построением нескольких деревьев можно отразить их динамику, т. е. развитие событий во времени. Для определения последовательности событий при аварии, включающей сложные взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности, используется дерево событий.

При наличии вероятностных характеристик отказов элементов оборудования сложной технической системы метод дает возможность получить количественные характеристики так называемой тяжелой аварии с разрушением защитных оболочек и выходом опасных веществ в окружающую среду.

Анализ опасностей с помощью «дерева последствий» потенциальной аварии (АОДПО) отличается от АОДП тем, что в этом случае задается потенциальное аварийное событие – инициатор, и исследуется вся группа событий – последствий, к которым оно может привести.

Анализ причин последствий начинается с выбора критического события.

Критические события выбирают таким образом, чтобы они служили удобными отправными точками для анализа, причем большинство аварийных ситуаций развивается за критическим событием в виде цепи отдельных событий.

Процедура построения диаграммы дерева последствий состоит из выбора первого инициирующего события, за которым следуют другие события, определенные на данном этапе работы.

При анализе «причин – последствий» используются комбинированные методы «дерева отказов» (выявить причины) и «дерева событий» (показать последствия), причем все явления рассматриваются в естественной последовательности их появления.

Анализ опасностей методом потенциальных отклонений (АОМ-ПО) включает процедуру искусственного создания отклонений с помощью ключевых слов. Для этого разбивают технологический процесс или техническую систему на составные части и, создавая с помощью ключевых слов отклонения, систематично изучают их потенциальные причины и те последствия, к которым они могут привести на практике.

Анализ ошибок персонала (АОП) является одним из важнейших элементов методологии оценки опасностей с учетом человеческого фактора, позволяющий охарактеризовать как ошибки, инициирующие или усугубляющие аварийную ситуацию, так и способность персонала совершить корректирующие действия по управлению аварией.

АОП включает следующие этапы:

- выбор системы и вида работы;
- определение цели;
- идентификацию вида потенциальной ошибки;
- идентификацию последствий;
- идентификацию возможности исправления ошибки;
- идентификацию причины ошибки;
- выбор метода предотвращения ошибки;
- оценку вероятности ошибки;
- оценку вероятности исправления ошибки;
- расчет риска; выбор путей снижения риска.

Причинно-следственный анализ (ПСА) выявляет причины произошедшей аварии или катастрофы и является составной частью общего анализа опасностей. Он завершается прогнозом новых аварий и составлением плана мероприятий по их предупреждению.

ПСА включает следующие этапы:

- сбор информации о точном и объективном описании аварии;
- составление перечня реальных событий, предшествовавших аварии;
- построение ориентированного графа – «дерева причин», начиная с последней стадии развития событий, т.е. с самой аварии;
- выявление логических связей «дерева причин»;
- формулирование предупредительных мер с целью исключения повторения аварии данного типа или для избежания аналогичных аварий.

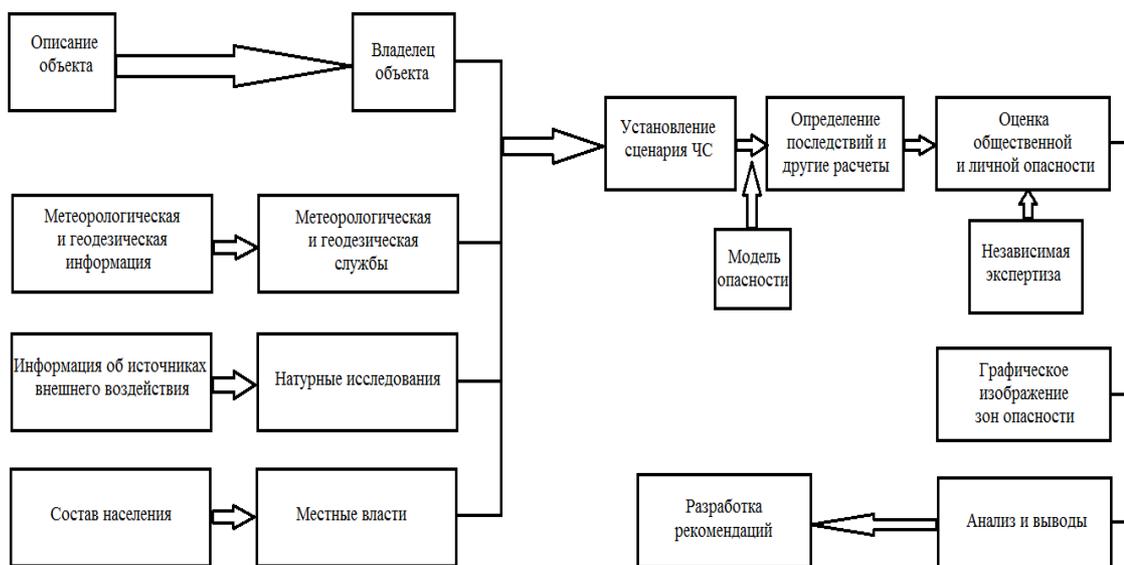


Рис. 4.1. Схема оценки опасности промышленного объекта

На различных стадиях реализации проекта требуются различные методы. В табл. 4.2 приведен список некоторых из этих стадий и соответствующих ему методов идентификации опасностей, дополняющий табл. 4.1.

Идеальной системы процедур идентификации опасности не существует.

Наиболее подходящая процедура до некоторой степени видоизменяется с учетом технического процесса.

Выбор методы идентификации опасности также зависит от цели, для которой выполняется исследование. При решении проблем безопасной эксплуатации оборудования на заводе подходит метод анализа опасности и работоспособности, а для идентификации источников утечек необходимо провести специальное рассмотрение такого рода источников.

Когда мы имеем дело с идентификацией опасности, то основным средством получения этого опыта в готовой форме и годного к использованию являются контрольные листы.

Таблица 4.2
Методы идентификации опасности для различных стадий реализации проектов

Стадия проекта	Метод идентификации опасности
Любые стадии	Аудит систем управления и безопасности Контрольные листы Опрос рабочих и инженеров
Исследование и разработка	Предварительный анализ опасностей Химикаты (токсичность, неустойчивость, взрывчатость) Реакции (взрывчатость) Примеси Пилотные заводские установки
Предпроект	Индексы опасности Проверка концепции безопасности проекта Методы экспертной оценки на качественном уровне Страховые оценки Исследования опасности
Проект	Метод проверочного листа Контрольные листы безопасности Метод барьерных диаграмм Исследование опасности и работоспособности Анализ видов и последствий отказов Деревья отказов и деревья событий Анализ опасности Оценка надежности Анализ надежности человеческого фактора
Ввод в действие	Анализ «что будет, если?» Мониторинг состояния Аудит безопасности завода Планы на случаи ЧС
Функционирование	Метод проверочного листа Не деструктивные испытания Мониторинг состояния Мониторинг коррозии Отслеживание сбоев Аудиты по исследованию износа оборудования Аудиты безопасности предприятия

4.1.1. Построение деревьев событий, отказов и решений при анализе опасности ТС

Основные определения и символы, используемые при построении деревьев событий и отказов

Схема И (схема совпадения): сигнал на выходе появляется только тогда, когда поступают все входные сигналы

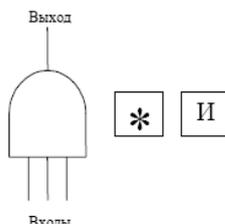


Схема ИЛИ (схема объединения): сигнал на выходе появляется при поступлении на вход любого одного или большего числа сигналов

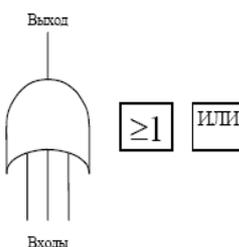
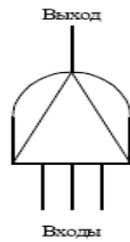


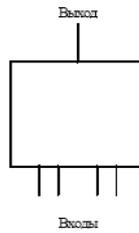
Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ: сигнал на выходе рассматривается как промежуточное событие и появляется при поступлении на вход одного и только одного сигнала



Схема И с приоритетом: логически эквивалентна схеме И, но входные сигналы должны поступать в определенном порядке



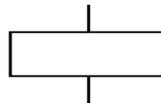
Специальная схема: отображает любую другую разрешенную комбинацию ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ



Вход или выход изображаются с помощью треугольников, что позволяет избежать повторения отдельных участков дерева. Прямая, входящая в вершину треугольника, означает переход внутрь соответствующей ветви, а прямая, берущая начало из середины боковой стороны треугольника, - переход к другой ветви



Результирующее событие: наступает в результате конкретной комбинации неисправностей на входе логической схемы



Событие, означающее первичный отказ (или неисправность элемента)



Неполное событие: неисправность, причины которой выявлены не полностью. Такое событие может быть детализировано путем показа вызы-

вающих его первичных неисправностей, и если этого не делается, то, значит, либо отсутствует необходимая информация, либо само событие не представляет особого интереса.



Пример использования основных логических символов при построении дерева отказов показан на рис. 4.2.

Нахождение аварийного события.

Для анализа причинных связей в системе имеется два подхода: анализ с прямым и анализ с обратным порядком.

Анализ с прямым порядком начинается с определением перечня отказов и развивается в прямом направлении с определением последствий этих событий. При этом используется индуктивная логика.

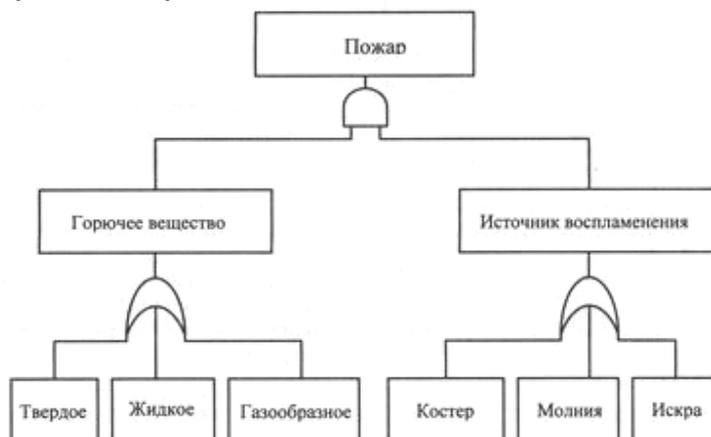


Рис. 4.2. *Использование логических символов И-ИЛИ при построении дерева отказов*

Анализ с обратным порядком начинается с отыскания опасного состояния системы. От него в обратном направлении отыскиваются возможные причины появления этого состояния. Здесь используется дедуктивная логика.

Характерным примером прямого подхода является построение дерева событий. Обратного – дерева отказов.

Для выполнения этих сценариев необходимы данные по взаимосвязи элементов и топографии системы.

Любая система включает в себя элементы оборудования, персонал, находящиеся в окружающей природной и социальной среде, и подвер-

гающиеся старению. Старение, окружающая среда и персонал могут влиять на систему только посредством влияния на элементы оборудования, каждый из которых связан с другим. Связи достаточно специфичны и заметно различаются для разных типов систем.

Характеристика отказов элементов.

При анализе причинных связей основными данными являются данные по отказам. Отказы классифицируются на первичные и вторичные, а также на ошибочные команды.

Первичный отказ элемента определяет его как нерабочее состояние, причиной которого является сам элемент. Подобные отказы происходят при входных воздействиях, находящихся в номинальном диапазоне. Основная причина первичных отказов – естественное старение.

При вторичных отказах сам элемент не является причиной отказа. Здесь причина в предыдущих или текущих избыточных нагрузках на элементы. Подобные нагрузки могут быть вызваны соседними элементами, окружающей средой или персоналом. (Пример, повышенное напряжение в сети может явиться причиной вторичного отказа элемента).

Если вид первичного или вторичного отказа определен и данные по нему известны, их рассматривают как исходные, которые в дереве отказов помещают в кружки.

Ошибочные команды представляются в виде элемента, находящегося в нерабочем состоянии из-за неправильного сигнала управления или помехи (пример такой команды: «оператор не включил сигнал оповещения»).

Характеристики отказов элементов приведены на рис. 4.3. Он включает «отказ элемента», виды отказов, их характеристику и причины.

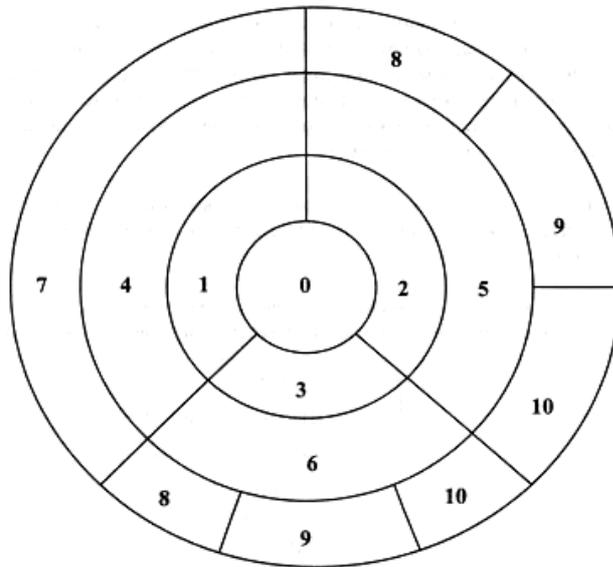


Рис. 4.3. Характеристики отказов элементов. 0 – отказ элемента; 1 – первичные отказы; 2 – вторичные отказы; 3 – ошибочные команды; 4 – элементы в заданных режимах работы; 5 – избыточные напряжения; 6 – ошибочные команды; 7 – естественное старение; 8 – соседние элементы; 9 – окружающая среда; 10 – персонал предприятия.

Построение дерева отказов

Дерево отказов - это топологическая модель надежности и безопасности, которая отражает логико-вероятностные взаимосвязи между отдельными случайными исходными событиями в виде первичных отказов или результирующих отказов, совокупность которых приводит к главному анализируемому событию. Таким образом, дерево отказов - это ориентированный граф в виде дерева.

Основной целью построения дерева неисправностей является символическое представление существующих в системе условий, способных вызвать ее отказ. Кроме того, построенное дерево позволяет показать в явном виде слабые места системы и является наглядным средством представления и обоснования принимаемых решений, а также средством исследования компромиссных соотношений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям.

Выделяют пять типов вершин дерева отказов (ДО):

- вершины, отображающие первичные отказы;
- вершины, отображающие результирующие или вторичные отказы;

- вершины, отображающие локальные отказы, которые не влияют на возникновение других отказов;
- вершины, соответствующие операции логического объединения случайных событий (типа *ИЛИ*);
- вершины, соответствующие операции логического произведения случайных событий (типа *И*).

Каждой вершине дерева отказов, отображающей первичный или результирующий отказ, соответствует определенная вероятность возникновения отказа. Одним из основных преимуществ дерева отказов является то, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов систем и событий, которые приводят к постулируемому отказу или аварии. Чтобы определить вероятность отказа, необходимо найти аварийные сочетания, для чего необходимо произвести качественный и количественный анализ дерева отказов.

Структура «дерева отказа» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются знаки «*И*» и «*ИЛИ*». Логический знак «*И*» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «*ИЛИ*» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Обычно предполагается, что исследователь, прежде чем приступить к построению дерева неисправностей, тщательно изучает систему. Поэтому описание системы должно быть частью документации, составленной в ходе такого изучения.

В зависимости от конкретных целей анализа дерева неисправностей для построения последнего специалисты по надежности обычно используют либо метод первичных отказов, либо метод вторичных отказов, либо метод инициированных отказов.

Эвристические правила для построения дерева отказов.

Алгоритм разработки отказа элемента приведен на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Разработка отказа элемента

При построении дерева отказов применяют семь основных правил:

- замена абстрактных событий менее абстрактными;
- разделение событий на более элементарные;
- точное определение причин событий;
- определение связи инициирующих событий с событиями типа «отсутствие защитных действий»;
- определение совместно действующих причин событий;
- точное указание места отказов элементов;
- детальная разработка отказов элементов в соответствии со схемой на рис. 4.1.

Метод первичных отказов.

Отказ элемента называется *первичным*, если он происходит в расчетных условиях функционирования системы. Построение дерева неисправностей на основе учета лишь первичных отказов не представляет большой сложности, так как дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ системы.

Пример 1. Требуется построить дерево неисправностей для простой системы — комнаты, в которой имеются выключатель и электрическая лампочка. Считается, что отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, а завершающим событием является отсутствие освещения в комнате.

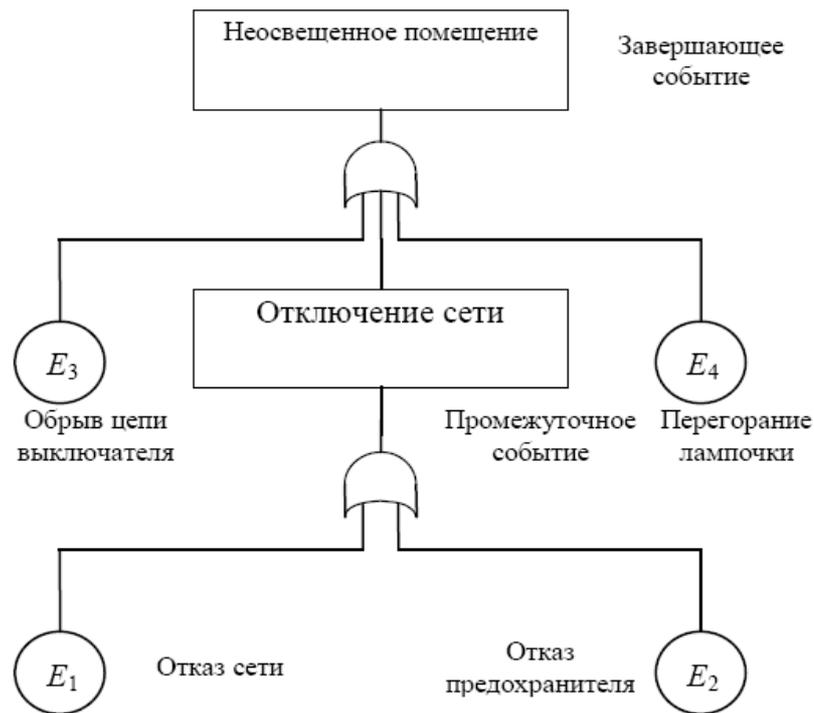


Рис. 4.5. *Дерево первичных отказов*

Основными, или первичными, событиями дерева неисправностей (рис. 4.5) являются (1) отказ источника питания E_1 , (2) отказ предохранителя E_2 , (3) отказ выключателя E_3 и (4) перегорание лампочки E_4 .

Промежуточным событием является прекращение подачи электроэнергии. Наибольший интерес представляет завершающее событие - «отсутствие света в комнате», и поэтому именно ему уделяется основное внимание при анализе. Дерево неисправностей, изображенное на рис. 8.1, показывает, что исходные события представляют собой входы схем ИЛИ: при наступлении любого из четырех первичных событий E_1 , E_2 , E_3 , E_4 осуществляется завершающее событие (отсутствие света в комнате).

Метод вторичных отказов.

Чтобы анализ охватывал и вторичные отказы, требуется более глубокое исследование системы. При этом анализ выходит за рамки рассмотрения системы на уровне отказов ее основных элементов, поскольку вторичные отказы вызываются

неблагоприятным воздействием окружающих условий или чрезмерными нагрузками на элементы системы в процессе эксплуатации.

Пример. На рис 4.6 показано простое дерево неисправностей с завершающим событием «прекращение выработки электроэнергии генератором».

Дерево отказов отображает такие первичные события, как отказ выключателя (отсутствие замыкания), неисправности внутренних цепей двигателя, источника питания и предохранителя. Вторичные отказы изображаются прямоугольником как промежуточное событие.

Вторичные отказы, изображенные на рис. 4.6, происходят вследствие неудовлетворительного технического обслуживания, неблагоприятного воздействия внешней среды, стихийного бедствия и т. д.

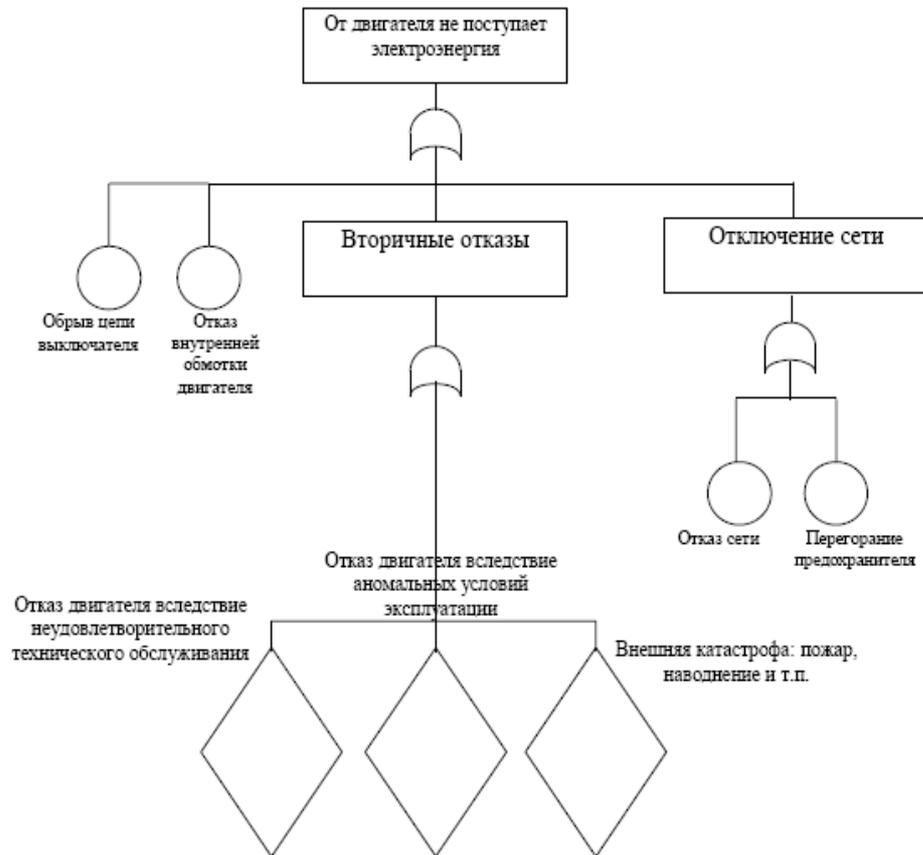


Рис. 4.6. Дерево неисправностей для случая вторичных отказов с завершающим событием «прекращение выработки электроэнергии генератором».

Метод иницированных отказов.

Подобные отказы возникают при правильном использовании элемента, но в неустановленное время или в неполюженном месте. Другими словами, иницированные отказы - это сбои операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события (нежелательного либо конечного).

Пример. Типичным примером иницированного отказа является поступление ошибочного сигнала на какое-либо электротехническое устройство

(например, двигатель или преобразователь). Взаимосвязь между основными и инициированными отказами показана на рис. 4.7.

Многообразие причин аварийности и травматизма наиболее полно и удобно представляется в виде диаграммы-дерева причин, отражающей процесс появления и развития цепи предпосылок. Основными компонентами диаграммы причин или опасностей являются узлы (или вершины) и взаимосвязи между ними. В качестве узлов подразумеваются события, свойства и состояния элементов рассматриваемой системы, а также логические условия их трансформации (сложение *ИЛИ* и перемножение *И*).

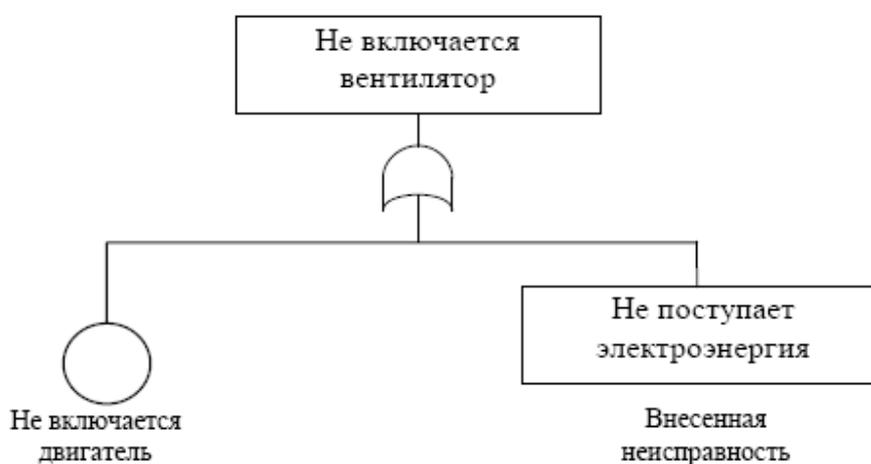


Рис. 4.7. Дерево неисправностей для случая основных и инициированных отказов

Операция «*И*» означает, что перед тем, как произойдет некоторое событие «*A*», должно произойти несколько событий, например, «*B*» и «*C*».

В вероятностном аспекте такая операция выражается логическим произведением:

$$P(A) = P(B) * P(C).$$

Операция «*ИЛИ*» означает, что некоторое событие «*F*» будет иметь место, если произойдет хотя бы одно из нескольких событий или все события, например, «*D*» и «*E*». В этом случае вероятность появления события «*F*» будет иметь вид алгебраической суммы:

$$P(F) = P(D) + P(E) - P(D) * P(E).$$

Построение дерева событий

Дерево событий используется для определения последовательности событий при аварии с применением индуктивной логики «что случится, если...».

На рис. 4.8 приведен классический пример построения дерева отказов при аварии на АЭС с потерей теплоносителя (*Медведев, 2002; Костерев, 2008; Хенли, Кумамото, 1984*). Авария начинается с разрушения трубопровода с вероятностью P_A . После этого анализируются возможные варианты развития событий, которые могут последовать далее. Дерево событий показывает все возможные события и оценку их вероятностей. На первой ветви рассматривается состояние электрического питания. Если питание есть, подвергается анализу аварийная система охлаждения активной зоны реактора.

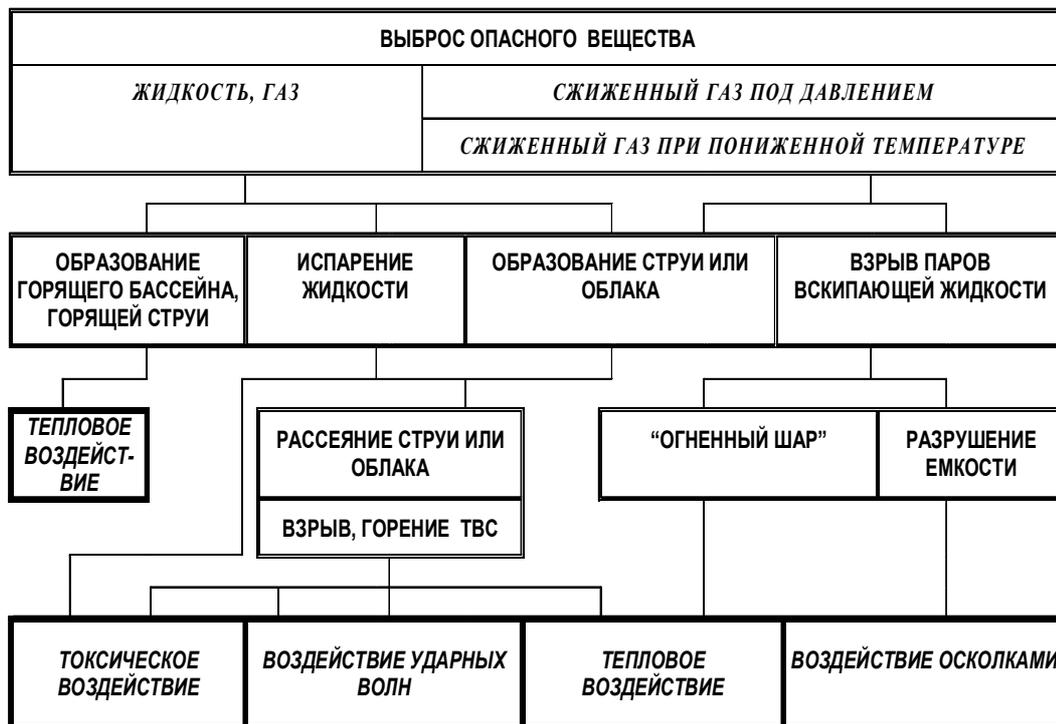


Рис. 4.9. Схема развития аварийных ситуаций с проявлением поражающих факторов (Гражданкин, 2009)

Дерево решений.

Дерево событий может быть преобразовано в дерево решений. В нем различают узлы событий P и узлы решений D .

Предполагается, что в узлах событий выбор дальнейшего пути s_{sl} определяется внешними условиями с соответствующими вероятностям $p(s_{sl})$, а в узлах решений – действиями (альтернативами) d_{rk} лица, принимающего решения. Все возможные действия можно связать с узлами решений (рис. 4.10).

В узле D возможны три варианта решений и три варианта действий d_{rk} : $D_1 - D_2$, $D_1 - D_3$, $D_1 - D_4$. В узлах событий $P_1 - P_6$ возможны различные случайные последующие реализации s_{sl} .

Деревья решений иерархически представляют собой логические структуры принятия решений, что облегчает процесс выработки правильных решений.

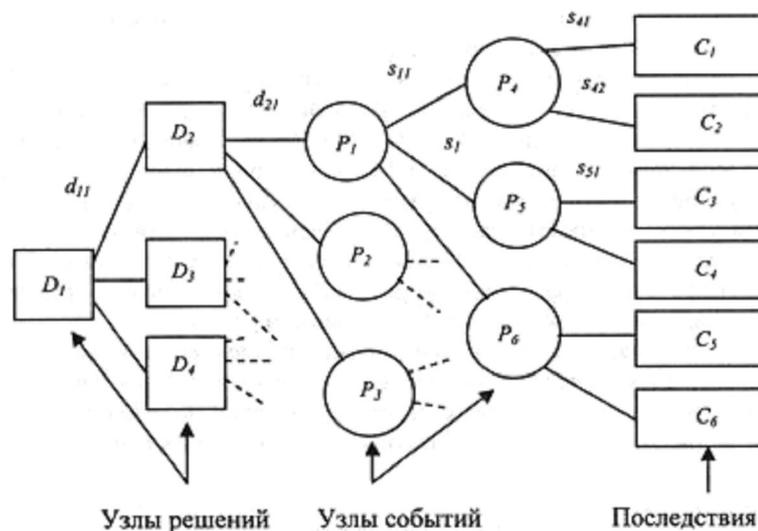


Рис. 4.10. Схематическое изображение дерева решений

Деревья решений легко поддаются модификации, их можно дополнительно развить или уменьшить путем исключения ветвей, не имеющих значения.

4.1.2. Аварийные сочетания.

С помощью дерева отказов виды отказов системы четко определяются при выявлении так называемых аварийных сочетаний.

Аварийное сочетание - определенный набор исходных событий, при одновременном наступлении которых гарантированно наступает конечное событие (авария).

На рис. 4.11 представлено дерево отказов для системы перекачки, построенное с соблюдением некоторых эвристических правил. В этой системе бак заполняется водой. Контроль ведется с помощью реле времени, контакты которого размыкаются при полном наполнении бака. Если этот механизм отказывает, звучит аварийная сирена и оператор выключает переключатель для того, чтобы предотвратить разрыв бака из-за переполнения.

Первичный отказ оператора означает, что оператор, который должен действовать по инструкции, не нажал аварийную кнопку при включении сирены. Вторичный отказ оператора происходит, если оператор не нажал

кнопку по независящим от него причинам (например, погиб при пожаре). Ошибочной командой от оператора является событие, когда «не прозвучала сирена».

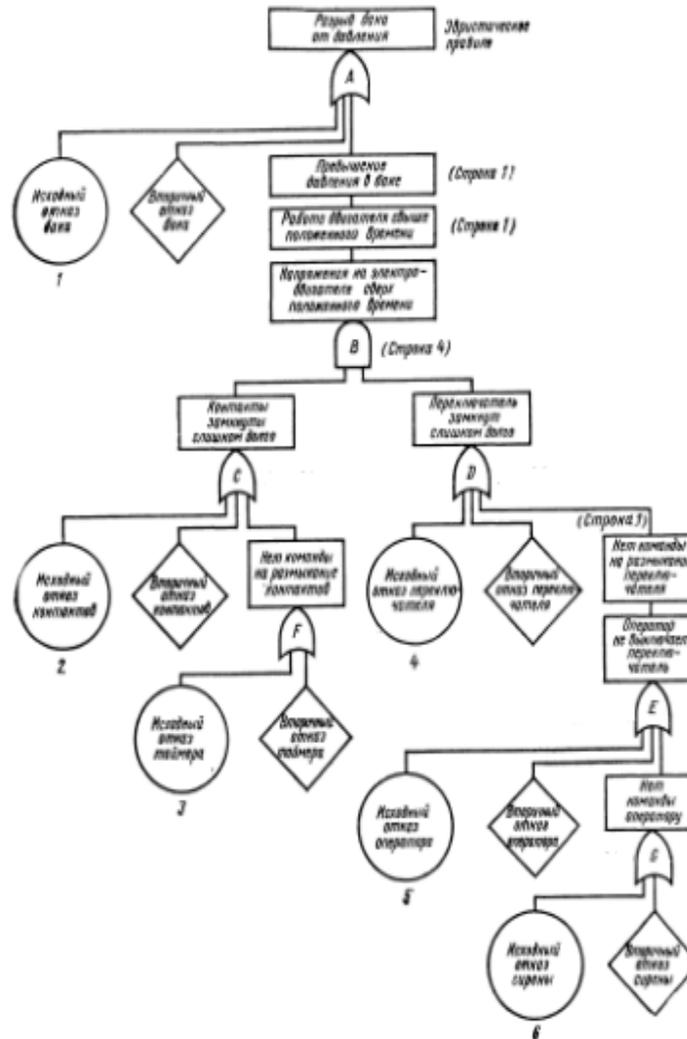


Рис. 4.11. Дерево отказов для системы перекачки (Хенли, Куamoto, 1984)

Если на представленном для этой системы дереве отказов события 2 и 4 происходят одновременно, конечное событие также происходит. То есть если одновременно происходит «отказ контактов (залипание)» и «отказ переключателя (залипание)», то происходит «разрыв бака под давлением». Таким образом, сочетание {2, 4} является аварийным для данной системы. Аварийным также являются сочетания {1} и {3, 5}.

Принцип проходного сочетания является дополнением принципа аварийного сочетания. Проходное сочетание есть определенный набор исходных событий. Если ни одно событий этого сочетания не происходит, гарантируется, что конечное событие не случится. Когда система имеет только одно конечное событие, отсутствие исходных отказов в проходном сочетании гарантирует успешное функционирование системы. Отсутствие этих отказов не гарантирует успешного функционирования системы, если имеется более одного конечного события. В этих случаях проходное сочетание обеспечивает лишь непоявление данного конкретного конечного события. Например, если события 1, 2, 3 на рис. 4.11 не происходят, конечное событие не может случиться. То есть, если бак, контакты и таймер находятся в нормальном состоянии, то бак не разрушится. Таким образом, сочетание $\{1, 2, 3\}$ есть проходное сочетание. Другим проходным сочетанием для данного дерева отказов является сочетание $\{1, 4, 5, 6\}$, то есть бак не разрушится, если эти аварийные сочетания не произойдут.

Современные технические системы имеют огромное количество элементов, дающие большое число аварийных сочетаний. Для упрощения анализа такой системы необходимо уменьшить число видов отказов. Следует рассматривать только те виды отказов, которые являются основными.

Основные виды отказов определяются принципом минимального аварийного сочетания. Минимальное аварийное сочетание – это такое сочетание, в котором при удалении любого исходного события оставшиеся события вместе не являются аварийным сочетанием.

Дерево отказов на рис. 4.11 имеет семь минимальных аварийных сочетаний: $\{1\}$, $\{2, 4\}$, $\{2, 5\}$, $\{2, 6\}$, $\{3, 4\}$, $\{3, 5\}$, $\{3, 6\}$. Аварийное сочетание $\{1, 2, 4\}$ не является минимальным, потому что оно включает сочетания $\{1\}$ и $\{2, 4\}$. Для реализации вида отказа $\{1, 2, 4\}$ должны произойти оба вида отказов системы: $\{1\}$ и $\{2, 4\}$.

Таким образом, все виды отказов были бы предотвращены, если бы можно было устранить возможность появления всех видов отказов, определяемых минимальными аварийными сочетаниями.

4.2. Методы исследования надежности технических систем

4.2.1. Математические зависимости для оценки надежности (Ветошкин, 2003)

Отказы, возникающие в процессе испытаний или эксплуатации, могут быть вызваны неблагоприятным сочетанием различных факторов — рассеянием действующих нагрузок, отклонением от номинального значения механических характеристик материалов, неблагоприятным сочетанием допусков в местах сопряжения и т. п. Поэтому в расчетах надежности различные параметры рассматривают как случайные величины, которые могут принимать то или иное значение, неизвестное заранее.

Различают случайные величины *прерывного* (дискретного) и *непрерывного* типов. Условимся случайные величины в дальнейшем обозначать большими буквами, а их возможные значения — соответствующими малыми. Для каждого числа x в диапазоне изменения случайной величины X существует определенная вероятность $P(X < x)$ того, что X не превышает значения x . Вероятность этого события называют *функцией распределения*:

$$F(x) = P(X < x). \quad (4.1)$$

Функция распределения — универсальная характеристика, так как она является функцией как непрерывных, так и дискретных случайных величин. Функция $F(x)$ относится к неубывающим функциям — x монотонно возрастает при непрерывных процессах и ступенчато возрастает при дискретных процессах. В пределах изменения случайной величины X эта функция изменяется от 0 до 1: $F(-\infty) = 0$; $F(\infty) = 1$;

Производную от функции распределения по текущей переменной называют *плотностью распределения*

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \quad (4.2)$$

которая характеризует частоту повторений данного значения случайной величины. В теории надежности величину $f(x)$ называют *плотностью вероятности*. Плотность распределения есть неотрицательная функция своего аргумента $f(x) \geq 0$.

Интеграл в бесконечных пределах от плотности распределения равен единице:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1.$$

В ряде случаев в качестве характеристик распределения случайных величин достаточно использовать некоторые числовые величины, среди

которых в теории надежности наиболее употребительными являются математическое ожидание (среднее значение), мода и медиана (характеризуют положение центров группирования случайных величин на числовой оси), дисперсия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации (характеризуют рассеяние случайной величины). Значения характеристик, полученные по результатам испытаний или эксплуатации, называют *статистическими оценками*. Характеристики распределения используют для прогнозирования надежности.

Для дискретных случайных величин *математическое ожидание* M_x равно сумме произведений всех возможных значений X на вероятности этих значений:

$$M_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (4.3)$$

Математическое ожидание для непрерывной случайной величины выражается интегралом в бесконечных пределах от произведения непрерывно изменяющихся возможных значений случайной величины на плотность распределения

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (4.4)$$

Математическое ожидание случайной величины непосредственно связано с ее средним значением. При неограниченном увеличении числа опытов среднее арифметическое значение величины x приближается к математическому ожиданию и называется *оценкой среднего значения*:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.5)$$

где n - общее число опытов; x_i - текущее значение случайной величины.

Дисперсией (D) случайной величины называют математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от ее математического ожидания.

Для дискретной случайной величины дисперсия равна:

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 p_i. \quad (4.6)$$

Для непрерывной случайной величины дисперсия определяется из выражения

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx. \quad (4.7)$$

Оценка дисперсии случайной величины:

$$D_x^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (4.8)$$

Дисперсия случайной величины является характеристикой *рассеяния* — разбросанности значений случайной величины около ее математического ожидания. *Размерность дисперсии* соответствует квадрату размерности случайной величины. Для наглядности в качестве характеристики рассеяния удобнее использовать величину, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины. Такой характеристикой может быть *среднее квадратическое отклонение* σ_x , которое определяется как корень квадратный из дисперсии:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (4.9)$$

Для оценки рассеяния с помощью безразмерной величины используют *коэффициент вариации*, который равен:

$$v_x = \frac{\sigma_x}{M_x}. \quad (4.10)$$

Модой случайной величины называют ее наиболее вероятное значение или то ее значение, при котором плотность вероятности максимальна.

Медиана характеризует расположение *центра группирования случайной величины*. Площадь под графиком функции плотности распределения делится медианой пополам.

Квантиль — значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности. Квантиль, соответствующую вероятности 0,5, называют медианой.

Аналогично предыдущим характеристикам понятия моды и медианы даны в статистической трактовке. Для *симметричного модального* (т.е. имеющего один максимум) *распределения* математическое ожидание, мода и медиана совпадают.

Пример 1. Функция распределения непрерывной случайной величины X задана выражением

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0; \\ ax^3 & \text{при } 0 < x \leq 1; \\ 1 & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

Найти коэффициент a и плотность распределения $f(x)$.

Решение. Так как функция распределения случайной величины X непрерывна, то при $x=1$, $ax^3 = 1$, откуда $a = 1$.

Плотность распределения выражается соотношением

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0; \\ 3x^2 & \text{при } 0 < x \leq 1; \\ 0 & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

Рассматривая случаи появления или отсутствия события A в большом числе испытаний, можно установить определенные закономерности появления этого события. Если при проведении n_1 испытаний событие A имело место m_1 раз, то *относительную частоту* появления события A определяют из соотношения

$$P^*(A) = \frac{m_1}{n_1}. \quad (4.11)$$

Если событие A имело место в каждом из n_1 испытаний, т. е. $m_1 = n_1$, то $P^*(A) = 1$. Если событие A не наступило ни в одном из n_1 испытаний, т. е. $m_1 = 0$, то $P^*(A) = 0$. При проведении серии последовательных испытаний получим соотношения:

$$P_1^* = \frac{m_1}{n_1}; P_2^* = \frac{m_2}{n_2}; \dots P_i^* = \frac{m_i}{n_i}. \quad (4.12)$$

Относительная частота становится более устойчивой при увеличении числа испытаний. Такая закономерность была замечена давно и подтверждена результатами решения различных примеров. Самыми известными примерами являются примеры бросания монеты или игральной кости. Так, при большом числе бросаний монеты относительная частота выпадания герба равна $\frac{1}{2}$ и равна относительной частоте выпадания цифры. При большом числе бросаний игральной кости относительная частота выпадания каждой стороны, на которой изображены цифры от 1 до 6, равна $\frac{1}{6}$.

Приведенные примеры показывают, что существует постоянная величина (в нашем случае $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{6}$), около которой колеблется относительная частота свершения случайного события и к которой она все более приближается с увеличением числа испытаний. Постоянную величину, к которой приближается относительная частота случайного события, называют *вероятностью случайного события A* и обозначают символом $P(A)$. На практике при большом числе испытаний вероятность случайного события приближенно принимают равной относительной частоте этого события:

Математическим основанием этого утверждения является *закон больших чисел* (Я. Бернулли) - вероятность отклонения относительной частоты некоторого события A от вероятности $P(A)$ этого события более чем на произвольно заданную величину $\varepsilon > 0$ становится сколь угодно малой, если число испытаний n неограниченно возрастает.

Таким образом, вероятность события $P(A)$ представляет собой число, заключенное в интервале от нуля до единицы, т. е. справедливо неравенство

$$0 \leq P(A) \leq 1. \quad (4.13)$$

Пример 2. Пусть проводится стрельба из артиллерийского орудия по щиту. В результате проведения 500 выстрелов число попаданий оказалось равным 450. Найти вероятность попадания по щиту при одном выстреле.

Решение. Общее число проведенных опытов $n = 500$, при этом число попаданий $m = 450$.

Используя формулу (11), найдем вероятность попадания: $P(A) = 0,9$.

Ответ: $P(A) = 0,9$.

Теорема сложения вероятностей

События могут быть совместными и несовместными. Два события называют **несовместными**, если в результате опыта **они не могут появиться одновременно**. И наоборот, события считаются **совместными**, если они **появляются одновременно в результате такого опыта**.

Вероятность суммы двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий

$$P(A+B) = P(A) + P(B) \quad (4.14)$$

Метод полной индукции позволяет использовать теорему сложения для произвольного числа несовместных событий. Так, *вероятность суммы нескольких событий* равна сумме вероятностей этих событий

$$P(A_1+A_2+\dots+A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) \quad (4.15)$$

или

$$P(\sum_{i=1}^n A_i) = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (4.16)$$

Пример 3. Пусть проводится стрельба из артиллерийского орудия по щиту с двумя зонами попадания. Вероятность попадания в первую зону при одном выстреле равна 0,40, во вторую 0,35. Найти вероятность промаха.

Решение. Обозначим через A — попадание, а через $A0$ — промах.
 Тогда событие
 $A=A_1+A_2$, где A_1 и A_2
 $P(A)=P(A_1)+P(A_2)=0,40+0,35=0,75$
 Тогда $P(A)=1 - P(A)=1 - 0,75 = 0,25$.
 Ответ: $P(A0) = 0,25$.

Теорема умножения вероятностей

События могут быть независимыми и зависимыми.

Событие A называют независимым от события B , если вероятность события A не зависит от того, произошло событие B или нет.

Событие A называют зависимым от события B , если вероятность события A меняется в зависимости от того, произошло событие B или нет.

Пример 4. Предположим, что опыт состоит в бросании двух монет, при этом рассматривают следующие события: событие A — появление герба на первой монете и событие B — появление герба на второй монете.

В этом случае вероятность события A не зависит от того, произошло событие B или нет, следовательно, событие A независимо от события B .

Пример 5. Пусть в урне имеется два белых и один черный шар. Два человека вынимают из урны по одному шару, при этом рассматриваются следующие события: событие A — появление белого шара у первого человека и событие B — появление белого шара у второго человека.

Вероятность события A до того, как станет известно что-либо о событии B , равна $2/3$.

Если стало известно, что событие B произошло, то вероятность события A становится равной $1/2$, из чего заключаем, что событие A зависит от события B .

Вероятность события A , вычисленная при условии, что имело место другое событие B , называется *условной вероятностью события A* и обозначается $P(A/B)$.

Для условий примера $P(A) = 2/3, P(A/B) = 1/2$.

Теорема.

Вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место, т.е.

$$P(AB)=P(A)*P(B/A) \tag{4.17}$$

Очевидно, что при применении теоремы умножения безразлично, какое из событий — A или B — считать первым, а какое вторым, и теорему можно записать так:

Два события называют независимыми, если появление одного из них не изменяет вероятности появления другого.

Понятие независимых событий может быть распространено на случай произвольного числа событий. *Несколько событий называют независимыми, если любое из них не зависит от любой совокупности остальных.*

Вероятность произведения двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий. Теорема умножения вероятностей может быть обобщена на случай произвольного числа событий.

В общем виде

вероятность произведения нескольких событий равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляют при условии, что все предыдущие имели место:

$$P(A_1A_2\dots A_n)=P(A_1)*P(A_2/A_1)*P(A_3/A_1A_2)\dots*P(A_n/A_1A_2\dots A_{n-1}). \quad (4.18)$$

В случае независимых событий теорема упрощается и принимает вид:

$$P(A_1A_2\dots A_n)=P(A_1)*P(A_2)\dots*P(A_n). \quad (4.19)$$

т. е. вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

$$P(\prod_{i=1}^n A_i) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (4.20)$$

Пример 6. Устройство состоит из пяти приборов, каждый из которых, независимо от других, может в течение времени t отказаться. Отказ хотя бы одного прибора приводит к отказу устройства. За время t вероятность безотказной работы каждого из приборов соответственно равна $P_1(t)=0,95$; $P_2(t)=0,99$; $P_3(t)=0,98$; $P_4(t)=0,90$; $P_5(t)=0,93$. Найти надежность устройства за время работы t .

Решение. Введем обозначения вероятностей безотказной работы первого – пятого приборов: $A_1 - A_5$.

Имеем: $A = A_1A_2A_3A_4A_5$.

По формуле умножения для независимых событий (19) получим:

$$P(A)=P(A_1)*P(A_2)*P(A_3)*P(A_4)*P(A_5)=0,95*0,99*0,98*0,90*0,93=0,76$$

Формула полной вероятности

Следствием обеих основных теорем - теоремы сложения вероятностей и теоремы умножения вероятностей - является *формула полной вероятности*.

Пусть требуется определить вероятность некоторого события A , которое может произойти вместе с одним из событий: H_1, H_2, \dots, H_n , образующих полную группу несовместных *событий, называемых гипотезами*.

В этом случае

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i) * P(A/H_i) \quad (4.21)$$

т. е. вероятность события A вычисляется как сумма произведений вероятности каждой гипотезы на вероятность события при этой гипотезе.

Пример 7. По движущемуся танку производят три выстрела из артиллерийского орудия. Вероятность попадания при первом выстреле равна 0,5; при втором - 0,7; при третьем - 0,8. Для вывода танка из строя заведомо достаточно трех попаданий. При одном попадании танк выходит из строя с вероятностью 0,3; при двух попаданиях - с вероятностью 0,9. Определить вероятность того, что в результате трех выстрелов танк выйдет из строя.

Решение.

Рассмотрим четыре гипотезы:

H_0 - в танк не попало ни одного снаряда.

H_1 - в танк попал один снаряд, H_2 - в танк попало два снаряда.

H_3 - в танк попало три снаряда.

Пользуясь теоремами сложения и умножения, найдем вероятности этих гипотез:

$$P(H_0) = 0,5 * 0,3 * 0,2 = 0,03;$$

$$P(H_1) = 0,5 * 0,3 * 0,2 + 0,5 * 0,7 * 0,2 + 0,5 * 0,3 * 0,8 = 0,22;$$

$$P(H_2) = 0,5 * 0,7 * 0,2 + 0,5 * 0,3 * 0,8 + 0,5 * 0,7 * 0,8 = 0,47;$$

$$P(H_3) = 0,5 * 0,7 * 0,8 = 0,28.$$

Условные вероятности события A (выход из строя танка) при этих гипотезах равны:

$$P(A/H_0) = 0; P(A/H_1) = 0,3; P(A/H_2) = 0,9; P(A/H_3) = 1,0.$$

Применяя формулу полной вероятности, получим

$$\begin{aligned} P(A) &= P(H_0) * P(A/H_0) + P(H_1) * P(A/H_1) + \\ &+ P(H_2) * P(A/H_2) + P(H_3) * P(A/H_3) = \\ &= 0,03 * 0 + 0,22 * 0,3 + 0,47 * 0,9 + 0,28 * 1,0 = 0,769. \end{aligned}$$

Если проводят n независимых опытов, в каждом из которых событие A появляется с вероятностью p , то вероятность того, что событие появится ровно m раз, выражается формулой Бернулли

$$P_m = C_n^m p^m q^{n-m},$$

$$\text{где } C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}; \quad q = 1 - p.$$

Пример 8. При проведении стрельб из орудия по щиту было зафиксировано десять промахов ($m = 10$) из пятисот выстрелов ($n = 500$). Определить вероятность того, что при ста выстрелах будет ровно четыре промаха, если считать, что все выстрелы независимы и вероятность промаха в каждом выстреле одинакова.

Решение. Найдем вероятность промаха при одном выстреле по формуле

$$P = m/n = 10/500 = 0,002.$$

Далее найдем вероятность появления четырех промахов из ста выстрелов

$$P_4 = C_{100}^4 0,2^4 \cdot 0,8^{100-4} \approx 0,000003.$$

Ответ: $P_4 \approx 0,000003$.

4.2.2. Основные методы оценки надежности технических систем (В.В. Костерев)

Под надежностью элемента (системы) понимается вероятность выполнения заданных функций в заданных условиях в течение заданного периода времени.

Оценка надежности начинается уже со стадии проектирования системы.

На практике чаще всего используются: метод дерева отказов, метод дерева событий, Марковский метод, метод таблиц решений, метод сокращения сети, анализ видов отказов и последствий и др.

Условно все методы оценки надежности разделяются на статические и динамические.

Основные статические модели оценки надежности.

Во многих случаях надежность технических систем оценивается без учета фактора времени, когда надежность их составляющих полагается постоянной. Вероятность отказа или надежность системы оценивается путем расчета вероятности отказа ее элементов, причем они отказывают

независимо друг от друга Вероятность отказа элементов считается неизменной во времени. Надежность системы при этом можно отобразить в виде блок-схемы, в которой элементы соединены различным образом. Ниже рассмотрены три типа соединений и методы оценки надежности путем их упрощения.

Оценка надежности системы из последовательно соединенных элементов.

Это соединение – наиболее простое из всех соединений (рис. 4.12). В нем все элементы должны быть рабочими: отказ одного ведет к прекращению работы всей системы.

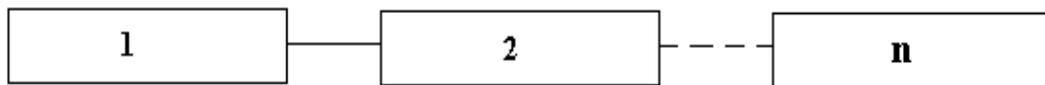


Рис. 4.12. Блок-схема последовательного соединения n элементов

Каждый блок представляет собой один элемент системы. Если любой из элементов отказывает – отказывает система. То есть, надежность системы определяется каждого элемента и равна

$$R_S^{\xi} = P(x_1; x_2; \dots x_n), \quad (4.22)$$

где R_S^{ξ} - надежность системы или вероятность ее безотказной работы; x_i – событие, означающее безотказную работу элемента i , $i=1, 2, \dots, n$; $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вероятность реализации событий x_1, x_2, \dots, x_n , где $P(x)$ – вероятность события i , $i=1, 2, \dots, n$.

Обозначив $R_i=P(x)$ получим

$$R_S^{\xi} = \prod_{i=1}^n R_i. \quad (4.23)$$

где R_i – надежность i -го элемента.

Таким образом, надежность системы из последовательно соединенных элементов равна произведению надежностей этих элементов. А в общем случае это всегда произведение надежности для независимых элементов.

Оценка надежности системы из параллельно соединенных элементов.

Это тип соединения (рис. 4.13)одновременно работающих элементов (для нормальной работы системы должен работать хотя бы один элемент).

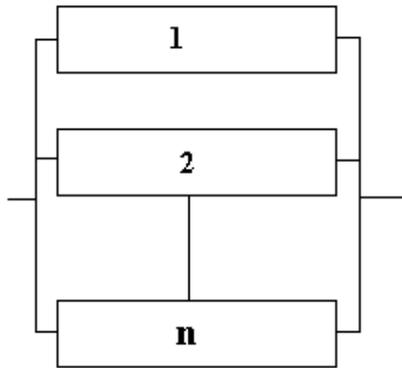


Рис. 4.13 Блок-схема параллельного соединения n элементов

Вероятность отказа определяется в этом случае как

$$P_s^p = P(x_1; x_2; \dots; x_n), \quad (4.24)$$

где x_i – событие, означающее отказ элемента, $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вероятность появления событий x_1, x_2, \dots, x_n .

Для независимо отказывающихся элементов это уравнение выглядит как

$$P_s^p = P(x_1) * P(x_2) \dots * P(x_n), \quad (4.25)$$

где $P(x_i)$ – вероятность события x_i (отказ элемента i).

Пример.

Система состоит из трех одновременно функционирующих независимых идентичных элементов. Ее работоспособность не нарушается, даже если функционирует только один элемент. Найти вероятность отказа системы, если вероятность отказа одного элемента равна 0,1.

Из уравнения (4.25) рассчитываем $P_s^p = 0,1 * 0,1 * 0,1 = 0,001$.

Оценка надежности системы в соединении типа моста.

Этот вид соединения элементов часто встречается в различных приложениях (рис. 4.14).

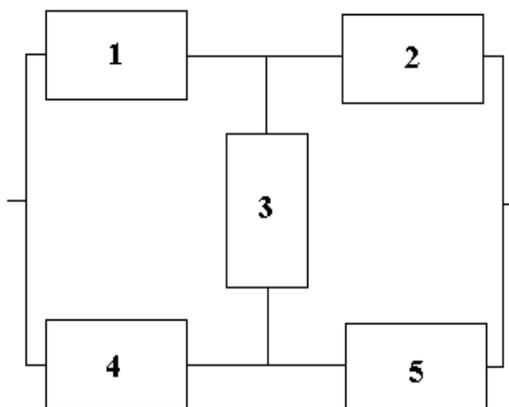


Рис. 4.14. Блок-схема соединения элементов типа моста

Надежность этой системы для случая, когда все ее элементы идентичны и независимы, выражается как

$$R_5^b = 2R^5 - 5R^4 + 2R^3 + 2R^2. \quad (4.26)$$

Динамические модели оценки надежности.

Статические модели оценки надежности ТС являются достаточно идеальными и реализуются достаточно редко. На практике надежность систем практически всегда изменяется со временем и не является величиной постоянной. На практике на основе данных по аварийности ТС вычисляется среднее время работы до отказа и частоту отказов. Среднее время работы до отказа описывается различными моделями, используя различные статистические распределения: нормальное, экспоненциальное, Вейбулла, гамма- и Рэлея. На практике наиболее часто используется экспоненциальное распределение ввиду его простоты.

Метод упрощения сети для оценки надежности системы.

Данный метод – один из самых простых методов оценки надежности ТС, состоящих из последовательно и параллельно соединенных элементов, а также соединений типа моста. Он заключается в том, что последовательно объединяя и уменьшая количество имеющихся в ТС последовательных и параллельных подсистем можно сложную систему свести к гипотетической единице. Конфигурации типа моста могут быть сведены к последовательным или параллельным соединениям с использованием различных методов разложения.

Пример.

Схема на рис. 4.15 представляет собой систему с независимыми элементами – каждый блок есть отдельный элемент. На рис. 4.15 рядом с элементами приведены надежности R_i для $i=1, 2, \dots, 5$. Требуется определить надежность системы с использованием метода упрощения.

Выделим подсистемы A , B , и C (рис. 4.15а). Подсистема A включает элементы 1 и 2, соединенные последовательно. Заменяем их одним гипотетическим элементом с надежностью

$$R_A = R_1 * R_2 = 0,4 * 0,5 = 0,2,$$

где R_A – надежность подсистемы A .

Таким образом, подсистема A упрощается до единственного гипотетического элемента с надежностью 0.2 (рис. 4.15б).

Левая часть системы содержит два элемента A и 3, соединенных параллельно. Упростим подсистему C , сведя ее к одному гипотетическому элементу:

$$R_C = 1 - (1 - R_A) * (1 - R_3) = 1 - (1 - 0,2) * (1 - 0,3) = 1 - 0,56 = 0,44.$$

Аналогично упростим систему B :

$$R_B = 1 - (1 - R_4) * (1 - R_5) = 1 - (1 - 0,6) * (1 - 0,5) = 1 - 0,2 = 0,8.$$

Соответствующая упрощенная схема приведена на рис. 4.15в.

Система упростилась до двух гипотетических элементов B и C , соединенных последовательно.

Надежность этой системы определяется как

$$R_S = R_B * R_C = 0,8 * 0,44 = 0,352.$$

Таким образом, исходная схема из пяти элементов упрощена до одного гипотетического элемента с надежностью R_S , которая равна надежности исходной сети.

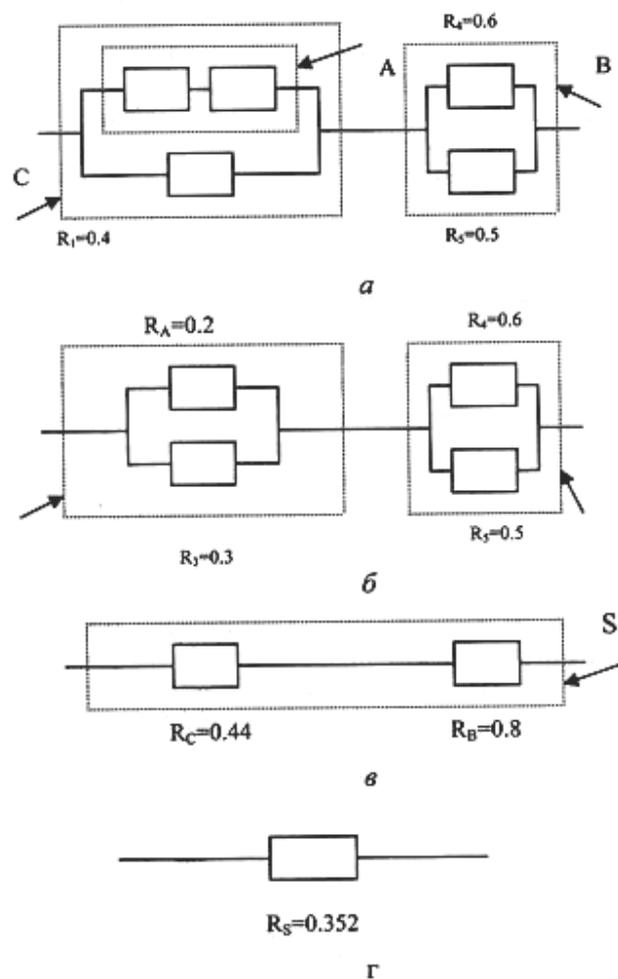


Рис. 4.15. Определение надежности системы путем упрощений

4.3. Оценка ущерба от аварий

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

Опасный производственный объект – предприятия или их цехи, участки, площадки, а также иные производственные объекты, на которых:

- получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются опасные вещества (воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды);
- используется оборудование, работающее под давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115°C;

- используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскалаторы, канатные дороги, фуникулеры;
- получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов;
- ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях.

Ущерб – потери некоторым субъектом или группой субъектов части или всех своих ценностей.

Основные производственные фонды – средства труда (здания, сооружения, передаточные устройства, машины и оборудование, измерительные и регулирующие приборы, вычислительная и оргтехника, устройства и лабораторное оборудование, транспортные средства и др.)

Оборотные фонды – предметы труда (производственные запасы, незавершенные производства, остатки готовой продукции на складах, отгруженная продукция).

Материальные ресурсы текущего потребления в непроизводственной сфере - предметы потребления (материалы, топливо, инвентарь, технические средства обучения и т.п.).

Первоначальная стоимость – сумма расходов на приобретение (а в случае если получено безвозмездно, - как сумма, в которую оценено такое имущество), сооружение, изготовление, доставку и доведение до состояния, в котором оно пригодно для использования, за исключением сумм налогов, подлежащих вычету или учитываемых в составе расходов.

Восстановительная стоимость – первоначальная стоимость с учетом проведенных переоценок на дату вступления в силу главы 25 Налогового кодекса РФ.

Стоимость воспроизводства – сумма затрат в рыночных ценах, существующая на дату проведения оценки, с применением идентичных материалов и технологий, с учетом износа объекта.

Остаточная стоимость – разница между первоначальной (восстановительной) стоимостью и суммой, начисленной за период амортизации (с учетом переоценки этой суммы).

Стоимость замещения – сумма затрат на создание объекта, аналогичного объекту оценки, в рыночных ценах, существующих на дату проведения оценки, с учетом износа объекта оценки.

Утилизационная стоимость – стоимость объекта оценки, равная рыночной стоимости материалов, которые он в себя включает, с учетом затрат на утилизацию объекта оценки.

Порядок определения ущерба

Структура ущерба от аварий на опасных производственных (4.16) объектах (рис. включает, как правило:

- полные финансовые потери организации, эксплуатирующей опасный производственный объект, на котором произошла авария;
- расходы на ликвидацию аварии;
- социально-экономические потери, связанные с травмированием и гибелью людей (как персонала организации, так и третьих лиц);
- вред, нанесенный окружающей природной среде;
- косвенный ущерб и потери государства от выбытия трудовых ресурсов.

При оценке ущерба от аварии на опасном производственном объекте за время расследования аварии (10 дней), как правило, подсчитываются те составляющие ущерба, для которых известны исходные данные. Окончательно ущерб от аварии рассчитывается после окончания сроков расследования аварии и получения всех необходимых данных. Составляющие ущерба могут быть рассчитаны независимо друг от друга.

Ущерб может быть записан в виде

$$P = P_{н.н.} + P_{л.а.} + P_{с.э.} + P_{н.в.} + P_{экол.} + P_{в.т.р.}, \quad (4.27)$$

где P – полный ущерб от аварии;

$P_{н.н.}$ – прямые потери организации, эксплуатирующей опасный производственный объект, руб.;

$P_{л.а.}$ – затраты на локализацию(ликвидацию) и расследование аварии, руб.;

$P_{с.э.}$ – социально-экономические потери (затраты, понесенные вследствие гибели и травматизма людей, руб.;

$P_{н.в.}$ – косвенный ущерб, руб.;

$P_{экол.}$ – экологический ущерб (урон, нанесенный объектам окружающей природной среды), руб.;

$P_{в.т.р.}$ – потери от выбытия трудовых ресурсов в результате гибели людей или потери ими трудоспособности, руб.;

Прямые потери

$$P_{н.н.} = P_{о.ф.} + P_{тмц} + P_{им} \quad (4.28)$$

где $P_{о.ф.}$ – потери предприятия в результате уничтожения (повреждения) основных фондов (производственных и непроизводственных), руб.;

$P_{т.м.ц}$ – потери предприятия в результате уничтожения (повреждения) товарно-материальных ценностей (продукции, сырья и т.п.), руб.;

$P_{и.м.}$ – потери в результате уничтожения (повреждения) имущества третьих лиц.

Затраты на локализацию (ликвидацию) и расследование аварии

$$P_{л.а.} = P_{л.} + P_{р.} \quad (4.29)$$

$P_{л.}$ – расходы, связанные с локализацией и ликвидацией последствий аварии, руб.;

$P_{р.}$ – расходы на расследование аварии, руб.

Социально-экономические потери $P_{с.э.}$ определяются как сумма затрат на компенсации и мероприятия вследствие гибели персонала $P_{г.п.}$ и третьих лиц $P_{г.т.л.}$ и (или) травмирования персонала $P_{т.п.}$ и третьих лиц $P_{т.т.л.}$.

$$P_{с.э.} = P_{г.п.} + P_{г.т.л.} + P_{т.п.} + P_{т.т.л.} \quad (4.30)$$

Косвенный ущерб $P_{н.в.}$ вследствие аварий определяется как сумма части доходов, недополученных предприятием в результате простоя $P_{п.п.}$, зарплаты и условно-постоянных расходов предприятия за время простоя $P_{з.п.}$, убытков, вызванных уплатой различных неустоек, штрафов, пени и т.д. $P_{ш.}$, убытков третьих лиц из-за недополученной ими прибыли $P_{п.н.т.л.}$.

$$P_{н.в.} = P_{п.п.} + P_{з.п.} + P_{ш.} + P_{п.н.т.л.} \quad (4.31)$$

Экологический ущерб $P_{экол.}$ определяется как сумма ущерба от различных видов вредного воздействия на объекты окружающей природной среды

$$P_{экол.} = Э_a + Э_в + Э_п + Э_о + Э_с, \quad (4.32)$$

где $Э_a$ – ущерб от загрязнения атмосферы, руб.;

$Э_в$ – ущерб от загрязнения водных ресурсов, руб.;

$Э_п$ – ущерб от загрязнения почвы, руб.;

\mathcal{E}_6 – ущерб, связанный с уничтожением биологических (в том числе лесных массивов) ресурсов, руб.;

\mathcal{E}_0 – ущерб от засорения (повреждения) территории обломками (осколками) зданий, сооружений, оборудования и т.д., руб.

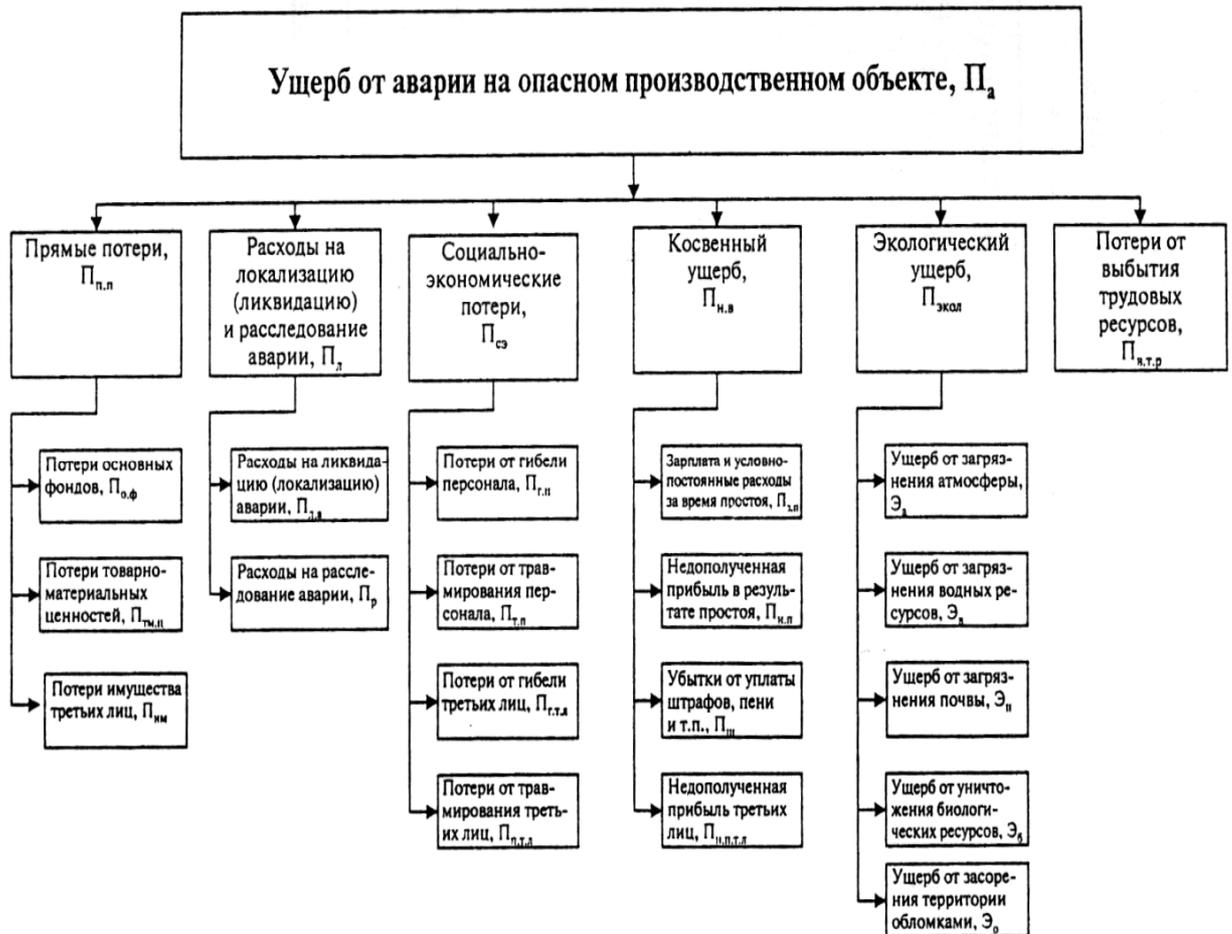


Рис. 4.16. Структура ущерба от аварии на опасном производственном объекте

Литература

1. *Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И.* Надежность технических систем и техногенный риск. — М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002 — 368 с.
2. *Белов С.В. (Ред.)* Безопасность жизнедеятельности. — М.: Высшая школа, 1999. — 448 с.
3. *Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А.* Глобальные климатические катастрофы. — М.: Гидрометеиздат, 1986. - 159 с.
4. *Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р.* Техногенный риск и безопасность. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. 2001.
5. *Ветошкин А.Г.* Надежность технических систем и техногенный риск. — Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. — 155 с.
6. *Гражданкин А. И.* Анализ опасностей и количественная оценка риска аварий на опасных производственных объектах: 4-е Всероссийское совещание заведующих кафедрами вузов по вопросам образования в области безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды. 21–26.09.2009. — М.: МГТУ.
7. *Дадонов Ю.А. и др.* Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418-01) — М.: Госгортехнадзор РФ, 2002. — 40 с.
8. *Денисов А.В. и др.* Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах (РД 03-496-02). — М.: Госгортехнадзор РФ, 2002. — 40 с.
9. *Иванов О.П., Рукин М.Д., Спиридонов Э.С.* Техногенная деятельность и природные катастрофы // Энергия. - 2005, № 9. С. 27-35.
10. *Инженерная экология: Учебник / Под ред. проф. В.Т. Медведева.* — М.: Гардарики, 2002. — 687 с: ил.
11. *Козлитин А. М., Яковлев Б.Н.* Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование и оценка. Детерминированные методы количественной оценки опасностей техносферы: Учеб. пособие. - Саратов: СГТУ, 2000. - 124с.
12. *Костерев В.В.* Надежность технических систем и управление риском: учебное пособие. — М.: МИФИ, 2008. — 280 с.
13. *Лекции по БЖД. // НГТУ. — 2007.*
14. *Лосев К.С.* Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. — М.: Космосинформ, 2001. - 400 с.
15. *Мазур И.И., Иванов О.П.* Опасные природные процессы. — М.: Экономика, 2004.- 702 с.

16. *Меньшиков В.В., Швыряев А.А.* Опасные химические объекты и техногенный риск: Учебное пособие. - М.: Изд-во МГУ, 2003. - 254 с.
17. *Стариков В.А.* Методические указания к курсовой работе «Оценка безопасности систем «человек-машина-среда» логико-вероятностным методом». Часть 1. – Тюмень: ТГНУ, 2002. – 29 с.
18. Стратегические риски России: оценка и прогноз. / Под общей редакцией *Ю.Л. Воробьева*. – М.: Деловой экспресс, 2005. – 385 с.
19. *Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П.* Человек и природа: противоречия и пути их преодоления. – Вестник РАН. 2002, Т. 72, № 5, С. 405-409.
20. *Хенли Э. Дж. Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска. — М.: Машиностроение, 1984. — 528 с, ил.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ
АНАЛИЗА РИСКА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ**

РД 03-418-01

2-е издание, исправленное и дополненное

Москва

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ГОСГОРТЕХНАДЗОРА РОССИИ»**

2002

Утверждены
постановлением Госгортехнадзора
России от 10.07.01 № 30
Введены в действие с 01.09.01 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ
АНАЛИЗА РИСКА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ¹**

¹ Указанный документ, согласно письму Минюста России от 20.08.01 № 07/8411-ЮД, в государственной регистрации не нуждается, поскольку не содержит правовых норм и носит нормативно-технический характер.

РД 03-418-01

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1. Настоящие Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (далее - Методические указания) устанавливают методические принципы, термины и понятия анализа риска, общие требования к процедуре и оформлению результатов, а также представляют основные методы анализа опасностей и риска аварий на опасных производственных объектах.

1.2. Методические указания разработаны в соответствии с требованиями и в развитие следующих документов:

Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ (Собрание законодательства Российской Федерации. 1997. № 30. Ст. 3588);

Федерального закона «О газоснабжении в Российской Федерации» (принят Государственной думой 12 марта 1999 г.);

Положения о порядке оформления декларации промышленной безопасности и перечне сведений, содержащихся в ней (РД 03-315-99). Утверждено постановлением Госгортехнадзора России от 07.09.99 № 66, зарегистрированным Минюстом России 07.10.99, регистрацион-

ный № 1926 (Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти от 25.10.99 № 43).

1.3. Методические указания предназначены для специалистов организаций, осуществляющих проектирование и эксплуатацию опасных производственных объектов, экспертных и страховых организаций, разработчиков деклараций промышленной безопасности и специалистов в области анализа риска.

2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В целях настоящего документа применяются следующие определения:

2.1. **Авария** - разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ (ст. 1 Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ).

2.2. **Анализ риска аварии** - процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды.

2.3. **Идентификация опасностей аварии** - процесс выявления и признания, что опасности аварии на опасном производственном объекте существуют, и определения их характеристик.

2.4. **Опасность аварии** - угроза, возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде вследствие аварии на опасном производственном объекте. Опасности аварий на опасных производственных объектах связаны с возможностью разрушения сооружений и (или) технических устройств, взрывом и (или) выбросом опасных веществ с последующим причинением ущерба человеку, имуществу и (или) нанесением вреда окружающей природной среде.

2.5. **Опасные вещества** - воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества и вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды, перечисленные в приложении 1 к Федеральному закону «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ.

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

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

2.8. **Риск аварии** - мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий. Основными количественными показателями риска аварии являются:

технический риск - вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта;

индивидуальный риск - частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий;

потенциальный территориальный риск (или потенциальный риск) - частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории;

коллективный риск - ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенное время;

социальный риск, или *F/N-кривая*, - зависимость частоты возникновения событий *F*, в которых пострадало на определенном уровне не менее *N* человек, от этого числа *N*. Характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей;

ожидаемый ущерб - математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенное время.

2.9. Требования промышленной безопасности - условия, запреты, ограничения и другие обязательные требования, содержащиеся в федеральных законах и иных нормативных правовых актах Российской Федерации, а также в нормативных технических документах, которые принимаются в установленном порядке и соблюдение которых обеспечивает промышленную безопасность (ст. 3 Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ).

2.10. Ущерб от аварии - потери (убытки) в производственной и непроизводственной сфере жизнедеятельности человека, вред окружающей природной среде, причиненные в результате аварии на опасном производственном объекте и исчисляемые в денежном эквиваленте.

3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах (далее - анализ риска) является составной частью управления промышленной безопасностью. Анализ риска заключается в систематическом использовании всей доступной информации для идентификации опасностей и оценки риска возможных нежелательных событий.

3.2. Результаты анализа риска используются при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов, экспертизе промышленной безопасности, обосновании технических решений по обеспечению безопасности, страховании, экономическом анализе безопасности по критериям «стоимость-безопасность-выгода», оценке воздействия хозяйственной деятельности на окружающую природную среду и при других процедурах, связанных с анализом безопасности.

3.3. Настоящие Методические указания являются основой для разработки методических документов (отраслевых методических указаний, рекомендаций, руководств, методик и т.п.) по проведению анализа риска на конкретных опасных производственных объектах.

3.4. Настоящие Методические указания не определяют необходимость, периодичность проведения анализа риска, а также конкретные уровни и критерии приемлемого риска. Конкретные требования к анализу риска, при необходимости, могут уточняться нормативными документами, отражающими специфику опасных производственных объектов.

3.5. Основные задачи анализа риска аварий на опасных производственных объектах заключаются в предоставлении лицам, принимающим решения:

- объективной информации о состоянии промышленной безопасности объекта;
- сведений о наиболее опасных, «слабых» местах с точки зрения безопасности;
- обоснованных рекомендаций по уменьшению риска.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА РИСКА

4.1. Основные этапы анализа риска

- 4.1.1. Процесс проведения анализа риска включает следующие основные этапы:
 - планирование и организацию работ;
 - идентификацию опасностей;

оценку риска;
разработку рекомендаций по уменьшению риска.

Содержание и основные требования к каждому этапу анализа риска определены и пп. 4.2-4.5.

4.1.2. Каждый этап анализа риска следует оформлять в соответствии с требованиями п. 6.

4.2. Планирование и организация работ

4.2.1. На этапе планирования работ следует:

определить анализируемый опасный производственный объект и дать его общее описание;
описать причины и проблемы, которые вызвали необходимость проведения анализа риска;
подобрать группу исполнителей для проведения анализа риска;
определить и описать источники информации об опасном производственном объекте;
указать ограничения исходных данных, финансовых ресурсов и другие обстоятельства, определяющие глубину, полноту и детальность проводимого анализа риска;
четко определить цели и задачи проводимого анализа риска;
обосновать используемые методы анализа риска;
определить критерии приемлемого риска.

4.2.2. Для обеспечения качества анализа риска следует использовать знание закономерностей возникновения и развития аварий на опасных производственных объектах. Если существуют результаты анализа риска для подобного опасного производственного объекта или аналогичных технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, то их можно применять в качестве исходной информации. Однако при этом следует показать, что объекты и процессы подобны, а имеющиеся отличия не будут вносить значительных изменений в результаты анализа.

4.2.3. Цели и задачи анализа риска могут различаться и конкретизироваться на разных этапах жизненного цикла опасного производственного объекта.

4.2.3.1. На этапе размещения (обоснования инвестиций или проведения предпроектных работ) или проектирования опасного производственного объекта целью анализа риска, как правило, является:

выявление опасностей и априорная количественная оценка риска с учетом воздействия поражающих факторов аварии на персонал, население, имущество и окружающую природную среду;

обеспечение учета результатов при анализе приемлемости предложенных решений и выборе оптимальных вариантов размещения опасного производственного объекта, применяемых технических устройств, зданий и сооружений опасного производственного объекта, включая особенности окружающей местности, расположение иных объектов и экономическую эффективность;

обеспечение информацией для разработки инструкций, технологического регламента и планов ликвидации (локализации) аварийных ситуаций на опасном производственном объекте;

оценка альтернативных предложений по размещению опасного производственного объекта или техническим решениям.

4.2.3.2. На этапе ввода в эксплуатацию (вывода из эксплуатации) опасного производственного объекта целью анализа риска могут быть:

выявление опасностей и оценка последствий аварий, уточнение оценок риска, полученных на предыдущих этапах функционирования опасного производственного объекта;

проверка соответствия условий эксплуатации требованиям промышленной безопасности;
разработка и уточнение инструкций по вводу в эксплуатацию (выводу из эксплуатации).

4.2.3.3. На этапе эксплуатации или реконструкции опасного производственного объекта целью анализа риска может быть:

проверка соответствия условий эксплуатации требованиям промышленной безопасности; уточнение информации об основных опасностях и рисках (в том числе при декларировании промышленной безопасности);

разработка рекомендаций по организации деятельности надзорных органов;

совершенствование инструкций по эксплуатации и техническому обслуживанию, планов ликвидации (локализации) аварийных ситуаций на опасном производственном объекте;

оценка эффекта изменения в организационных структурах, приемах практической работы и технического обслуживания в отношении совершенствования системы управления промышленной безопасностью.

4.2.4. При выборе методов анализа риска следует учитывать цели, задачи анализа, сложность рассматриваемых объектов, наличие необходимых данных и квалификацию привлекаемых для проведения анализа специалистов. Приоритетными в использовании являются методические материалы, согласованные или утвержденные Госгортехнадзором России или иными федеральными органами исполнительной власти.

4.2.5. На этапе планирования выявляются управленческие решения, которые должны быть приняты, а также требующиеся для этого исходные и выходные данные.

4.2.6. Основным требованием к выбору или определению критерия приемлемого риска является его обоснованность и определенность. При этом критерии приемлемого риска могут задаваться нормативной документацией, определяться на этапе планирования анализа риска и (или) в процессе получения результатов анализа. Критерии приемлемого риска следует определять исходя из совокупности условий, включающих определенные требования безопасности и количественные показатели опасности. Условие приемлемости риска может выражаться в виде условий выполнения определенных требований безопасности, в том числе количественных критериев.

Основой для определения критериев приемлемого риска являются:

нормы и правила промышленной безопасности или иные документы по безопасности в анализируемой области;

сведения о происшедших авариях, инцидентах и их последствиях;

опыт практической деятельности;

социально-экономическая выгода от эксплуатации опасного производственного объекта.

4.3. Идентификация опасностей

4.3.1. Основные задачи этапа идентификации опасностей - выявление и четкое описание всех источников опасностей и путей (сценариев) их реализации. Это ответственный этап анализа, так как не выявленные на этом этапе опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению и исчезают из поля зрения.

4.3.2. При идентификации следует определить, какие элементы, технические устройства, технологические блоки или процессы в технологической системе требуют более серьезного анализа и какие представляют меньший интерес с точки зрения безопасности.

4.3.3. Для идентификации опасностей рекомендуется применять методы, изложенные в п. 5.3.

4.3.4. Результатом идентификации опасностей являются:

перечень нежелательных событий;

описание источников опасности, факторов риска, условий возникновения и развития нежелательных событий (например, сценариев возможных аварий);

предварительные оценки опасности и риска¹.

¹ Например, при идентификации опасностей, при необходимости, могут быть представлены показатели опасности применяемых веществ, оценки последствий для отдельных сценариев аварий и т.п.

4.3.5. Идентификация опасностей завершается также выбором дальнейшего направления деятельности. В качестве вариантов дальнейших действий может быть:

решение прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей или достаточности полученных предварительных оценок²;

² В этом случае под идентификацией опасностей подразумевается анализ или оценка опасностей.

решение о проведении более детального анализа опасностей и оценки риска;

выработка предварительных рекомендаций по уменьшению опасностей.

4.4. Оценка риска

4.4.1. Основные задачи этапа оценки риска:

определение частот возникновения инициирующих и всех нежелательных событий;

оценка последствий возникновения нежелательных событий;

обобщение оценок риска.

4.4.2. Для определения частоты нежелательных событий рекомендуется использовать:

статистические данные по аварийности и надежности технологической системы, соответствующие специфике опасного производственного объекта или виду деятельности;

логические методы анализа «деревьев событий», «деревьев отказов», имитационные модели возникновения аварий в человекомашиной системе;

экспертные оценки путем учета мнения специалистов в данной области.

4.4.3. Оценка последствий включает анализ возможных воздействий на людей, имущество и (или) окружающую природную среду. Для оценки последствий необходимо оценить физические эффекты нежелательных событий (отказы, разрушения технических устройств, зданий, сооружений, пожары, взрывы, выбросы токсичных веществ и т.д.), уточнить объекты, которые могут быть подвергнуты опасности. При анализе последствий аварий необходимо использовать модели аварийных процессов и критерии поражения, разрушения изучаемых объектов воздействия, учитывать ограничения применяемых моделей. Следует также учитывать и, по возможности, выявлять связь масштабов последствий с частотой их возникновения.

4.4.4. Обобщенная оценка риска (или степень риска) аварий должна отражать состояние промышленной безопасности с учетом показателей риска от всех нежелательных событий, которые могут произойти на опасном производственном объекте, и основываться на результатах:

интегрирования показателей рисков всех нежелательных событий (сценариев аварий) с учетом их взаимного влияния;

анализа неопределенности и точности полученных результатов;

анализа соответствия условий эксплуатации требованиям промышленной безопасности и критериям приемлемого риска.

При обобщении оценок риска следует, по возможности, проанализировать неопределенность и точность полученных результатов. Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска. Как правило, основными источниками неопределенностей являются неполнота информации по надежности оборудования и человеческим ошибкам, принимаемые предположения и допущения используемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать результаты оценки риска, необходимо понимать характер неопределенностей и их причины. Источники неопределенности следует идентифицировать (например, «человеческий фактор»), оценить и представить в результатах.

4.5. Разработка рекомендаций по уменьшению риска

4.5.1. Разработка рекомендаций по уменьшению риска является заключительным этапом анализа риска. В рекомендациях представляются обоснованные меры по уменьшению риска, основанные на результатах оценок риска.

4.5.2. Меры по уменьшению риска могут носить технический и (или) организационный характер. При выборе мер решающее значение имеет общая оценка действенности и надежности мер, оказывающих влияние на риск, а также размер затрат на их реализацию.

4.5.3. На стадии эксплуатации опасного производственного объекта организационные меры могут компенсировать ограниченные возможности для принятия крупных технических мер по уменьшению риска.

4.5.4. При разработке мер по уменьшению риска необходимо учитывать, что вследствие возможной ограниченности ресурсов в первую очередь должны разрабатываться простейшие и связанные с наименьшими затратами рекомендации, а также меры на перспективу.

4.5.5. В большинстве случаев первоочередными мерами обеспечения безопасности, как правило, являются меры предупреждения аварии. Выбор планируемых для внедрения мер безопасности имеет следующие приоритеты:

меры по уменьшению вероятности возникновения аварийной ситуации, включающие:

меры по уменьшению вероятности возникновения инцидента,

меры по уменьшению вероятности перерастания инцидента в аварийную ситуацию,

меры по уменьшению тяжести последствий аварии, которые, в свою очередь, имеют следующие приоритеты:

меры, предусматриваемые при проектировании опасного объекта (например, выбор несущих конструкций, запорной арматуры),

меры, относящиеся к системам противоаварийной защиты и контроля (например, применение газоанализаторов),

меры, касающиеся готовности эксплуатирующей организации к локализации и ликвидации последствий аварий.

4.5.6. При необходимости обоснования и оценки эффективности предлагаемых мер по уменьшению риска рекомендуется придерживаться двух альтернативных целей их оптимизации:

при заданных средствах обеспечить максимальное снижение риска эксплуатации опасного производственного объекта;

при минимальных затратах обеспечить снижение риска до приемлемого уровня.

4.5.7. Для определения приоритетности выполнения мер по уменьшению риска в условиях заданных средств или ограниченности ресурсов следует:

определить совокупность мер, которые могут быть реализованы при заданных объемах финансирования;

ранжировать эти меры по показателю «эффективность-затраты»;

обосновать и оценить эффективность предлагаемых мер.

5. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА РИСКА

5.1. При выборе методов проведения анализа риска необходимо учитывать этапы функционирования объекта (проектирование, эксплуатация и т.д.), цели анализа, критерии приемлемого риска, тип анализируемого опасного производственного объекта и характер опасности, наличие ресурсов для проведения анализа, опыт и квалификацию исполнителей, наличие необходимой информации и другие факторы.

Так, на стадии идентификации опасностей и предварительных оценок риска¹ рекомендуется применять методы качественного анализа и оценки риска, опирающиеся на продуманную процедуру, специальные вспомогательные средства (анкеты, бланки, опросные листы, инструкции) и практический опыт исполнителей.

¹ Эта стадия может именоваться анализом опасностей.

Практика показывает, что использование сложных количественных методов анализа риска зачастую дает значения показателей риска, точность которых для сложных технических систем невелика. В связи с этим проведение полной количественной оценки риска более эффективно для сравнения источников опасностей или различных вариантов мер безопасности (например, при размещении объекта), чем для составления заключения о степени безопасности объекта. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях и единственно допустимы, в частности для сравнения опасностей различной природы, оценки последствий крупных аварий или для иллюстрации результатов.

Обеспечение необходимой информацией является важным условием проведения оценки риска. Вследствие недостатка статистических данных на практике рекомендуется использовать экспертные оценки и методы ранжирования риска, основанные на упрощенных методах количественного анализа риска. В этих подходах рассматриваемые события или элементы обычно разбиваются по величине вероятности, тяжести последствий и риска на несколько групп (или категорий, рангов), например, с высоким, промежуточным, низким или незначительным уровнем риска. При таком подходе высокий уровень риска может считаться (в зависимости от специфики объекта) неприемлемым (или требующим особого рассмотрения), промежуточный уровень риска требует выполнения программы работ по уменьшению уровня риска, низкий уровень считается приемлемым, а незначительный вообще может не рассматриваться (подробнее см. приложение 2).

5.2. При выборе и применении методов анализа риска рекомендуется придерживаться следующих требований:

метод должен быть научно обоснован и соответствовать рассматриваемым опасностям;

метод должен давать результаты в виде, позволяющем лучше понять формы реализации опасностей и наметить пути снижения риска;

метод должен быть повторяемым и проверяемым.

5.3. На стадии идентификации опасностей рекомендуется использовать один или несколько из перечисленных ниже методов анализа риска:

«Что будет, если..?»;

проверочный лист;

анализ опасности и работоспособности;

анализ видов и последствий отказов;

анализ «дерева отказов»;

анализ «дерева событий»;

соответствующие эквивалентные методы.

Краткие сведения о методах анализа риска и рекомендации по их применению представлены в приложении [2](#).

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА РИСКА

6.1. Результаты анализа риска должны быть обоснованы и оформлены таким образом, чтобы выполненные расчеты и выводы могли быть проверены и повторены специалистами, которые не участвовали при первоначальном анализе.

6.2. Процесс анализа риска следует документировать. Объем и форма отчета с результатами анализа зависят от целей проведенного анализа риска. В отчет рекомендуется включать

(если иное не определено нормативными правовыми документами, например документами по оформлению деклараций промышленной безопасности):

- титульный лист;
- список исполнителей с указанием должностей, научных званий, названием организации;
- аннотацию;
- содержание (оглавление);
- задачи и цели проведенного анализа риска;
- описание анализируемого опасного производственного объекта;
- методологию анализа, исходные предположения и ограничения, определяющие пределы анализа риска;
- описание используемых методов анализа, моделей аварийных процессов и обоснование их применения;
- исходные данные и их источники, в том числе данные по аварийности и надежности оборудования;
- результаты идентификации опасности; результаты оценки риска;
- анализ неопределенностей результатов оценки риска; обобщение оценок риска, в том числе с указанием наиболее «слабых» мест;
- рекомендации по уменьшению риска;
- заключение;
- перечень используемых источников информации.

ПОКАЗАТЕЛИ РИСКА

Всесторонняя оценка риска аварий основывается на анализе причин (отказы технических устройств, ошибки персонала, внешние воздействия) возникновения и условий развития аварий, поражения производственного персонала, населения, причинения ущерба имуществу эксплуатирующей организации или третьим лицам, вреда окружающей природной среде. Чтобы подчеркнуть, что речь идет об «измеряемой» величине, используется понятие «степень риска» или «уровень риска». Степень риска аварий на опасном производственном объекте, эксплуатация которого связана со множеством опасностей, определяется на основе учета соответствующих показателей риска. В общем случае показатели риска выражаются в виде сочетания (комбинации) вероятности (или частоты) и тяжести последствий рассматриваемых нежелательных событий.

Ниже даны краткие характеристики основных количественных показателей риска.

1. При анализе опасностей, связанных с отказами технических устройств, выделяют **технический риск**, показатели которого определяются соответствующими методами теории надежности.

2. Одной из наиболее часто употребляющихся характеристик опасности является **индивидуальный риск** - частота поражения отдельного индивидуума (человека) в результате воздействия исследуемых факторов опасности. В общем случае количественно (численно) индивидуальный риск выражается отношением числа пострадавших людей к общему числу рискующих за определенный период времени. При расчете распределения риска по территории вокруг объекта (картировании риска) индивидуальный риск определяется потенциальным территориальным риском (см. ниже) и вероятностью нахождения человека в районе возможного действия опасных факторов. Индивидуальный риск во многом определяется квалификацией и готовностью индивидуума к действиям в опасной ситуации, его защищенностью. Индивидуальный риск, как правило, следует определять не для каждого человека, а для групп людей, характеризующихся примерно одинаковым временем пребывания в различных опасных зонах и использующих одинаковые средства защиты. Рекомендуется оценивать индиви-

дуальный риск отдельно для персонала объекта и для населения прилегающей территории или, при необходимости, для более узких групп, например для рабочих различных специальностей.

3. Другим комплексным показателем риска, характеризующим пространственное распределение опасности по объекту и близлежащей территории, является **потенциальный территориальный риск** - частота реализации поражающих факторов в рассматриваемой точке территории. Потенциальный территориальный, или потенциальный, риск не зависит от факта нахождения объекта воздействия (например, человека) в данном месте пространства. Предполагается, что условная вероятность нахождения объекта воздействия равна 1 (т.е. человек находится в данной точке пространства в течение всего рассматриваемого промежутка времени). Потенциальный риск не зависит от того, находится ли опасный объект в многолюдном или пустынном месте и может меняться в широком интервале. Потенциальный риск, в соответствии с названием, выражает собой потенциал максимально возможной опасности для конкретных объектов воздействия (реципиентов), находящихся в данной точке пространства. Как правило, потенциальный риск оказывается промежуточной мерой опасности, используемой для оценки социального и индивидуального риска при крупных авариях. Распределения потенциального риска и населения в исследуемом районе позволяют получить количественную оценку социального риска для населения. Для этого нужно рассчитать количество пораженных при каждом сценарии от каждого источника опасности и затем определить частоту событий F , при которой может пострадать на том или ином уровне N и более человек.

4. **Социальный риск** характеризует масштаб и вероятность (частоту) аварий и определяется функцией распределения потерь (ущерба), у которой есть установившееся название - **F/N -кривая**¹. В общем случае в зависимости от задач анализа под N можно понимать и общее число пострадавших, и число смертельно травмированных или другой показатель тяжести последствий. Соответственно критерий приемлемого риска будет определяться уже не числом для отдельного события, а кривой, построенной для различных сценариев аварии с учетом их вероятности. В настоящее время общераспространенным подходом для определения приемлемости риска является использование двух кривых, когда, например, в логарифмических координатах определены F/N -кривые приемлемого и неприемлемого риска смертельного травмирования. Область между этими кривыми определяет промежуточную степень риска, вопрос о снижении которой следует решать, исходя из специфики производства и региональных условий.

¹ В зарубежных работах - кривая Фармера.

5. Другой количественной интегральной мерой опасности объекта является **коллективный риск**, определяющий ожидаемое количество пострадавших в результате аварий на объекте за определенное время.

6. Для целей экономического регулирования промышленной безопасности и страхования важным является такой показатель риска, как статистически **ожидаемый ущерб** в стоимостных или натуральных показателях.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА РИСКА

Ниже представлена краткая характеристика основных методов, рекомендуемых для проведения анализа риска.

1. Методы **проверочного листа** и «**Что будет, если..?**» или их комбинация относятся к группе методов качественных оценок опасности, основанных на изучении соответствия условий эксплуатации объекта или проекта требованиям промышленной безопасности.

Результатом проверочного листа является перечень вопросов и ответов о соответствии опасного производственного объекта требованиям промышленной безопасности и указания по их обеспечению. Метод проверочного листа отличается от «Что будет, если..?» более обширным представлением исходной информации и представлением результатов о последствиях нарушений безопасности.

Эти методы наиболее просты (особенно при обеспечении их вспомогательными формами, унифицированными бланками, облегчающими на практике проведение анализа и представление результатов), нетрудоемки (результаты могут быть получены одним специалистом в течение одного дня) и наиболее эффективны при исследовании безопасности объектов с известной технологией.

2. **Анализ видов и последствий отказов (АВПО)** применяется для качественного анализа опасности рассматриваемой технической системы¹. Существенной чертой этого метода является рассмотрение каждого аппарата (установки, блока, изделия) или составной части системы (элемента) на предмет того, как он стал неисправным (вид и причина отказа) и какое было бы воздействие отказа на техническую систему.

¹ Под технической системой, в зависимости от целей анализа, могут пониматься как совокупность технических устройств, так и отдельные технические устройства или их элементы.

Анализ видов и последствий отказа можно расширить до количественного **анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО)**. В этом случае каждый вид отказа ранжируется с учетом двух составляющих критичности - вероятности (или частоты) и тяжести последствий отказа. Определение параметров критичности необходимо для выработки рекомендаций и приоритетности мер безопасности.

Результаты анализа представляются в виде таблиц с перечнем оборудования, видов и причин возможных отказов, с частотой, последствиями, критичностью, средствами обнаружения неисправности (сигнализаторы, приборы контроля и т.п.) и рекомендациями по уменьшению опасности.

Систему классификации отказов по критериям вероятности-тяжести последствий следует конкретизировать для каждого объекта или технического устройства с учетом его специфики.

Ниже (табл. 1) в качестве примера приведены показатели (индексы) уровня и критерии критичности по вероятности и тяжести последствий отказа. Для анализа выделены четыре группы, которым может быть нанесен ущерб от отказа: персонал, население, имущество (оборудование, сооружения, здания, продукция и т.п.), окружающая среда.

В табл. 1 применены следующие варианты критериев:

критерии отказов по тяжести последствий: катастрофический отказ - приводит к смерти людей, существенному ущербу имуществу, наносит невосполнимый ущерб окружающей среде; критический (некритический) отказ - угрожает (не угрожает) жизни людей, приводит (не приводит) к существенному ущербу имуществу, окружающей среде; отказ с пренебрежимо малыми последствиями - отказ, не относящийся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий;

категории (критичность) отказов: *A* - обязателен количественный анализ риска или требуются особые меры обеспечения безопасности; *B* - желателен количественный анализ риска или требуется принятие определенных мер безопасности; *C* - рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности; *D* - анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуются.

Таблица 1

Матрица «вероятность-тяжесть последствий»

Отказ	Частота воз-	Тяжесть последствий отказа
-------	--------------	----------------------------

		катастрофического	критического	некритического	С пренебрежимо малыми последствиями
Частый	> 1	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
Вероятный	$1 - 10^{-2}$	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Возможный	$10^{-2} - 10^{-4}$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Редкий	$10^{-4} - 10^{-6}$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Практически невероятный	$< 10^{-6}$	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>D</i>

Методы АВПО, АВПКО применяются, как правило, для анализа проектов сложных технических систем или технических решений. Выполняются группой специалистов различного профиля (например, специалистами по технологии, химическим процессам, инженером-механиком) из 3-7 человек в течение нескольких дней, недель.

3. Методом **анализа опасности и работоспособности** (АОР) исследуются опасности отклонений технологических параметров (температуры, давления и пр.) от регламентных режимов. АОР по сложности и качеству результатов соответствует уровню АВПО, АВПКО.

В процессе анализа для каждой составляющей опасного производственного объекта или технологического блока определяются возможные отклонения, причины и указания по их недопущению. При характеристике отклонения используются ключевые слова «нет», «больше», «меньше», «также, как», «другой», «иначе, чем», «обратный» и т.п. Применение ключевых слов помогает исполнителям выявить все возможные отклонения. Конкретное сочетание этих слов с технологическими параметрами определяется спецификой производства.

Примерное содержание ключевых слов следующее:

- «нет» - отсутствие прямой подачи вещества, когда она должна быть;
- «больше (меньше)» - увеличение (уменьшение) значений режимных переменных по сравнению с заданными параметрами (температуры, давления, расхода);
- «так же, как» - появление дополнительных компонентов (воздух, вода, примеси);
- «другой» - состояние, отличающиеся от обычной работы (пуск, остановка, повышение производительности и т.д.);
- «иначе, чем» - полное изменение процесса, непредвиденное событие, разрушение, разгерметизация оборудования;
- «обратный» - логическая противоположность замыслу, появление обратного потока вещества.

Результаты анализа представляются на специальных технологических листах (таблицах). Степень опасности отклонений может быть определена количественно путем оценки вероятности и тяжести последствий рассматриваемой ситуации по критериям критичности аналогично методу АВПКО (см. табл. 1).

Отметим, что метод АОР, так же как АВПКО, кроме идентификации опасностей и их ранжирования позволяет выявить неясности и неточности в инструкциях по безопасности и способствует их дальнейшему совершенствованию. Недостатки методов связаны с затрудненностью их применения для анализа комбинаций событий, приводящих к аварии.

4. Практика показывает, что крупные аварии, как правило, характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях возникновения и развития аварии (отказы оборудования, ошибки человека, нерасчетные внешние воздействия, разрушение, выброс, пролив вещества, рассеяние веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т.д.) Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют **логико-графические методы анализа «деревьев отказов» и «деревьев событий».**

При анализе «деревьев отказов» (АДО) выявляются комбинации отказов (неполадок) оборудования, инцидентов, ошибок персонала и нерасчетных внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящие к головному событию (аварийной ситуации). Метод используется для анализа возможных причин возникновения аварийной ситуации и расчета ее частоты (на основе знания частот исходных событий). При анализе «дерева отказа» (аварии) рекомендуется определять минимальные сочетания событий, определяющие возникновение или невозможность возникновения аварии (минимальное пропускное и отсечное сочетания, соответственно, см. пример 2 приложения 3).

Анализ «дерева событий» (АДС) - алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации). Используется для анализа развития аварийной ситуации. Частота каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события (например, аварии с разгерметизацией оборудования с горючим веществом в зависимости от условий могут развиваться как с воспламенением, так и без воспламенения вещества).

5. Методы количественного анализа риска, как правило, характеризуются расчетом нескольких показателей риска, упомянутых в приложении 1, и могут включать один или несколько вышеупомянутых методов (или использовать их результаты). Проведение количественного анализа требует высокой квалификации исполнителей, большого объема информации по аварийности, надежности оборудования, выполнения экспертных работ, учета особенностей окружающей местности, метеоусловий, времени пребывания людей в опасных зонах и других факторов.

Количественный анализ риска позволяет оценивать и сравнивать различные опасности по единым показателям, он наиболее эффективен:

- на стадии проектирования и размещения опасного производственного объекта;
- при обосновании и оптимизации мер безопасности;
- при оценке опасности крупных аварий на опасных производственных объектах, имеющих однотипные технические устройства (например, магистральные трубопроводы);
- при комплексной оценке опасностей аварий для людей, имущества и окружающей природной среды.

6. Рекомендации по выбору методов анализа риска для различных видов деятельности и этапов функционирования опасного производственного объекта представлены ниже (табл. 2).

В табл. 2 приняты следующие обозначения: 0 - наименее подходящий метод анализа; + - рекомендуемый метод; ++ - наиболее подходящий метод.

Методы могут применяться изолированно или в дополнение друг к другу, причем методы качественного анализа могут включать количественные критерии риска (в основном, по экспертным оценкам с использованием, например, матрицы «вероятность-тяжесть последствий» ранжирования опасности). По возможности полный количественный анализ риска должен использовать результаты качественного анализа опасностей.

Таблица 2

Рекомендации по выбору методов анализа риска

Метод	Вид деятельности				
	Размещение (предпроектные работы)	Проектирование	Ввод или вывод из эксплуатации	Эксплуатация	Реконструкция

Метод	Вид деятельности				
	Размещение (предпроектные работы)	Проектирование	Ввод или вывод из эксплуатации	Эксплуатация	Реконструкция
Анализ «Что будет, если..?»	0	+	++	++	+
Метод проверочного листа	0	+	+	++	+
Анализ опасности и работоспособности	0	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отказов	0	++	+	+	++
Анализ «деревьев отказов и событий»	0	++	+	+	++
Количественный анализ риска	++	++	0	+	++

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ОПАСНОСТИ И ОЦЕНКИ РИСКА

Пример 1. Применение метода качественного анализа опасности.

В табл. 3 представлен фрагмент результатов анализа опасности и работоспособности цеха холодильно-компрессорных установок. В процессе анализа для каждой установки, производственной линии или блока определяются возможные отклонения, причины и рекомендации по обеспечению безопасности. При характеристике каждого возможного отклонения используются ключевые слова «нет», «больше», «меньше», «так же, как», «другой», «иначе, чем», «обратный» и т.п. В табл. 3 приведены также экспертные балльные оценки вероятности возникновения рассматриваемого отклонения В, тяжести последствий Т и показателя критичности $K = В + Т$. Показатели В и Т определялись по 4-балльной шкале (балл, равный 4, соответствует максимальной опасности).

Отклонения, имеющие повышенные значения критичности, далее рассматривались более детально, в том числе при построении сценариев аварийных ситуаций и количественной оценке риска.

Пример 2. Анализ «деревьев отказов и событий».

Пример «дерева событий» для количественного анализа различных сценариев аварий на установке переработки нефти представлен на рис. 1. Цифры рядом с наименованием события показывают условную вероятность возникновения этого события. При этом вероятность возникновения инициирующего события (выброс нефти из резервуара) принята равной 1. Значение частоты возникновения отдельного события или сценария пересчитывается путем умножения частоты возникновения инициирующего события на условную вероятность развития аварии по конкретному сценарию.

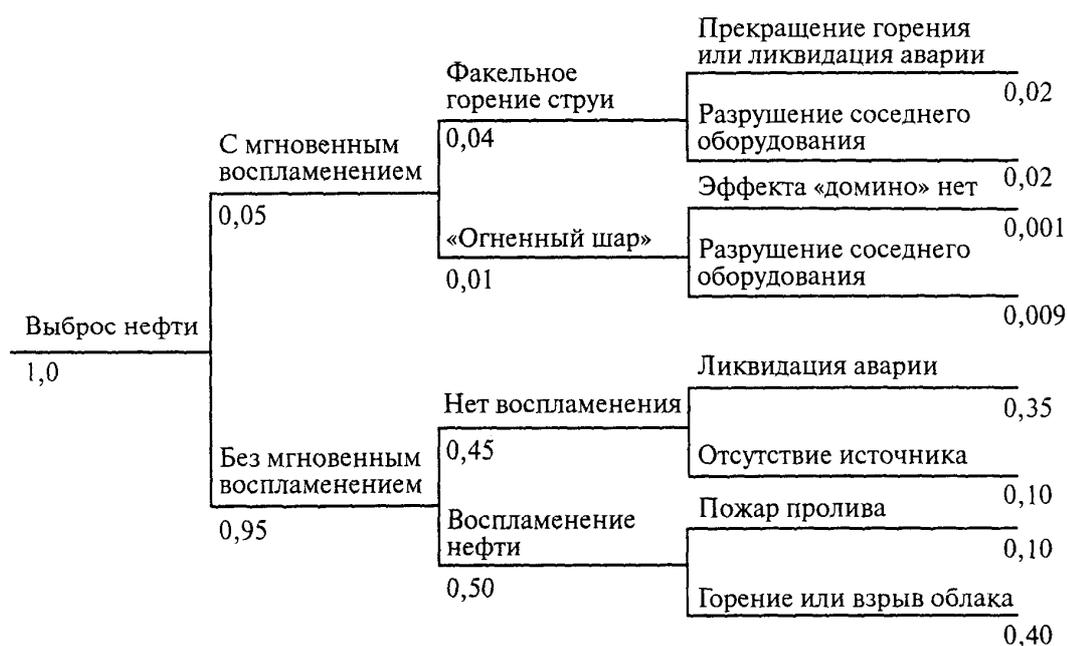


Рис. 1. «Дерево событий» аварий на установке первичной переработки нефти

Таблица 3

Перечень отклонений при применении метода изучения опасности и работоспособности компрессорного узла цеха холодильно-компрессорных установок (фрагмент результатов)

Ключевое слово	Отклонение	Причины	Последствия				Рекомендации
				В	Т	К	

Ключевое слово	Отклонение	Причины	Последствия	В	Т	К	Рекомендации
Меньше	Нет потока вещества	1. Разрыв трубопровода 2. Отказ в системе электропитания	Выбор аммиака Опасности нет	2 3	4 1	6 4	Установить систему аварийной сигнализации Повысить надежность системы резервирования
Больше	Повышение давления нагнетания компрессора	3. Закрыт нагнетательный вентиль	Разрушение компрессора и выброс аммиака	1	2	3	Заменить реле давления, предохранительный и обратные клапаны
		4. Отсутствует или недостаточная подача воды на конденсатор	Как в п. 3	1	2	3	
		5. Наличие большого количества воздуха в конденсаторе	Образование взрывоопасной смеси	1	3	4	-
		6. Нет протока воды через охлаждаемую рубашку компрессора	Разрушение компрессора с выбросом аммиака	1	2	3	Установить реле температуры на компрессорах ВД и НД
		7. Чрезмерный перегрев паров аммиака на всасывании	Как в п. 6	1	2	3	-
Меньше	Понижение давления всасывания	8. Повышенная производительность компрессора	Опасности нет	1	1	2	Проверить реле давления

Пример «дерева отказа», используемого для анализа причин возникновения аварийных ситуаций при автоматизированной заправке емкости, приведен на рис. 2. Структура «дерева отказа» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «дерева» используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Так, «дерево», представленное на рис. 2, имеет промежуточные события (прямоугольники), тогда как в нижней части «дерева» кругами с цифрами показаны постулируемые исходные события-предпосылки, наименование и нумерация которых приведены в табл. 4.

Анализ «дерева отказа» позволяет выделить ветви прохождения сигнала к головному событию (в нашем случае на рис. 2 их три), а также указать связанные с ними минимальные пропускные сочетания, минимальные отсечные сочетания.

Минимальные пропускные сочетания - это набор исходных событий-предпосылок (на рис. 2 отмечены цифрами), обязательное (одновременное) возникновение которых достаточно для появления головного события (аварии). Для «дерева», отображенного на рис. 2, такими событиями и (или) сочетаниями являются: {12}, {13}, {1•7}, {1•8}, {1•9}, {1•10}, {1•11}, {2•7}, {2•8}, {2•9}, {2•10}, {2•11}, {3•7}, {3•8}, {3•9}, {3•10}, {3•11}, {4•7}, {4•8}, {4•9}, {4•10}, {4•11}, {5•6•7}, {5•6•8}, {5•6•9}, {5•6•10}, {5•6•11}. Используются главным образом для выявления «слабых» мест.

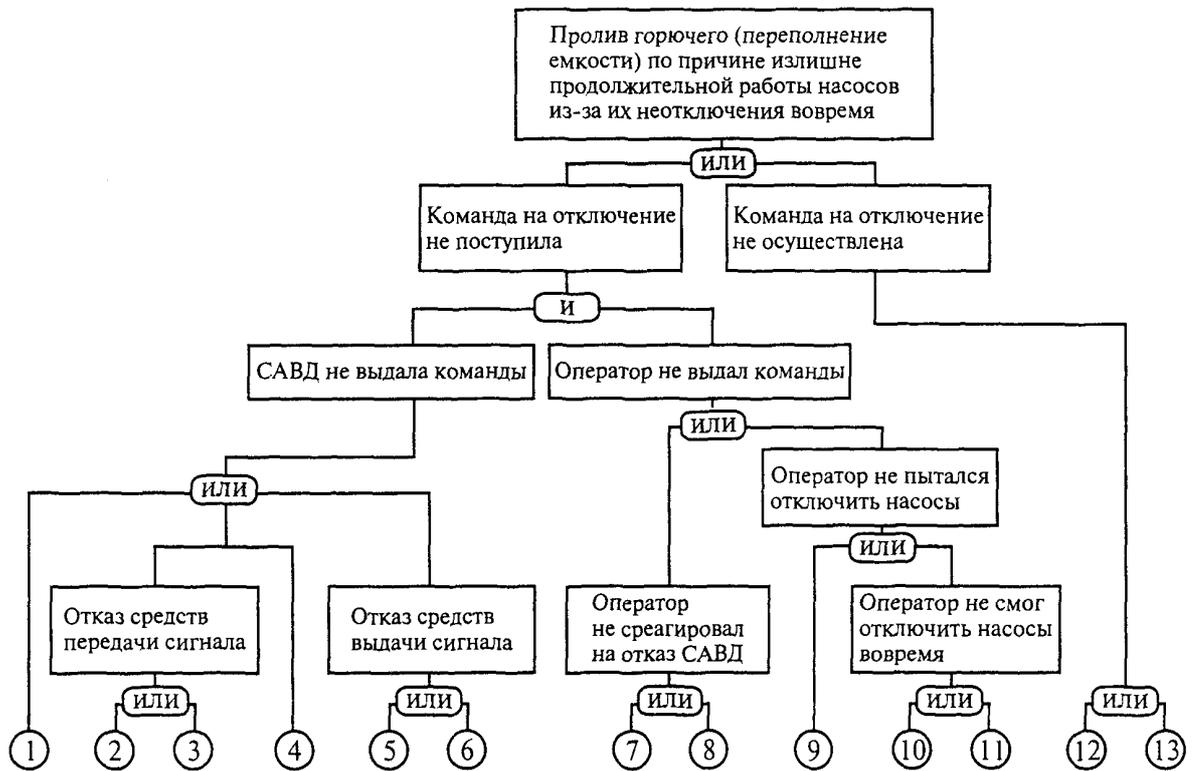


Рис. 2. «Дерево отказа» заправочной операции

Таблица 4

Исходные события «дерева отказа» (согласно рис. 2)

№ п/п	Событие или состояние модели	Вероятность события P_i
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)	0,0005
2	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы	0,00001
3	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее воздействие)	0,0001
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера	0,0003
6	Отказ датчика уровня	0,0002
7	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД (ошибка оператора)	0,005
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД (ошибка оператора)	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 хронометра	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насоса	0,00001
13	Обрыв цепей управления приводом насоса	0,00001

Минимальные отсечные сочетания - набор исходных событий, который гарантирует отсутствие головного события при условии не возникновения ни одного из составляющих этот набор событий: $\{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 12 \cdot 13\}$, $\{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 12 \cdot 13\}$, $\{7 \cdot 8 \cdot 9 \cdot 10 \cdot 11 \cdot 12 \cdot 13\}$. Используются главным образом для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии.

Пример 3. Распределение потенциального территориального риска.

Распределение потенциального территориального риска, характеризующего максимальное значение частоты поражения человека от возможных аварий для каждой точки площадки объекта и прилегающей территории, показано на рис. 3 (цифрами у изолиний указана частота смертельного поражения человека за один год, при условии его постоянного местонахождения в данной точке).

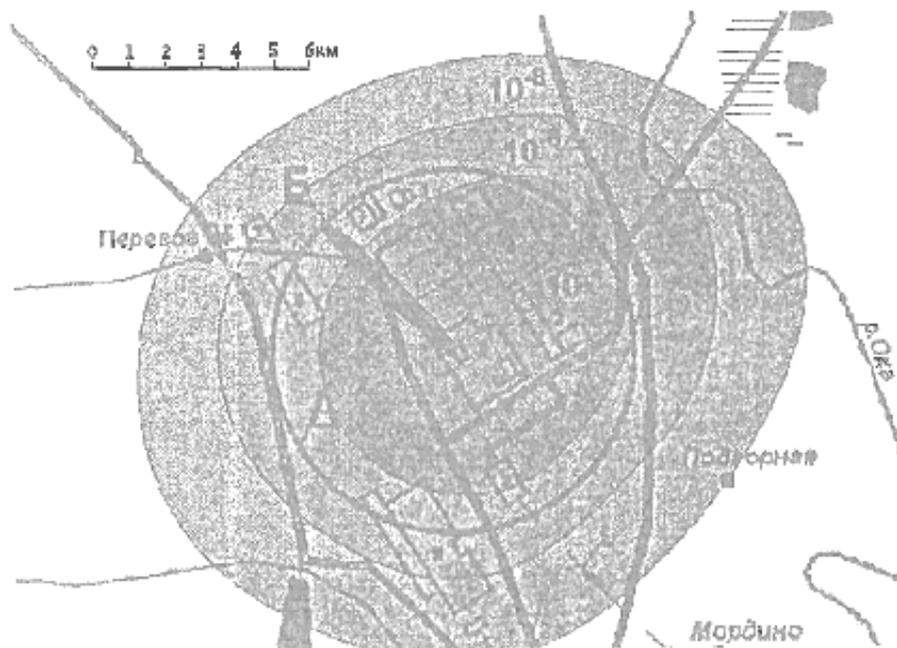


Рис. 3. Распределение потенциального риска по территории вблизи объекта, на котором возможны аварии с крупным выбросом токсических веществ:

А - граница зон поражения людей, рассчитанных для сценариев аварии с одинаковой массой выброса по всем направлениям ветра; Б - зона поражения для отдельного сценария при заданном направлении ветра.

Пример 4. Количественные показатели риска аварий на магистральных нефтепроводах.

В соответствии с Методическим руководством по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах основными показателями риска являются интегральные (по всей длине трассы нефтепровода) и удельные (на единицу длины нефтепровода) значения:

- частоты утечки нефти в год;
- ожидаемых среднегодовых площадей разливов и потерь нефти от аварий;
- ожидаемого ущерба (как суммы ежегодных компенсационных выплат за загрязнение окружающей среды и стоимости потерянной нефти).

На рис. 4 представлено распределение ожидаемого ущерба вдоль трассы нефтепровода.

Оценки риска могут быть использованы при обосновании страховых тарифов при страховании ответственности за ущерб окружающей среде от аварий и выработке мер безопасности. В частности, линейные участки нефтепроводов с наиболее высокими показателями риска должны быть приоритетными при проведении внутритрубной диагностики или ремонта трубопроводов.

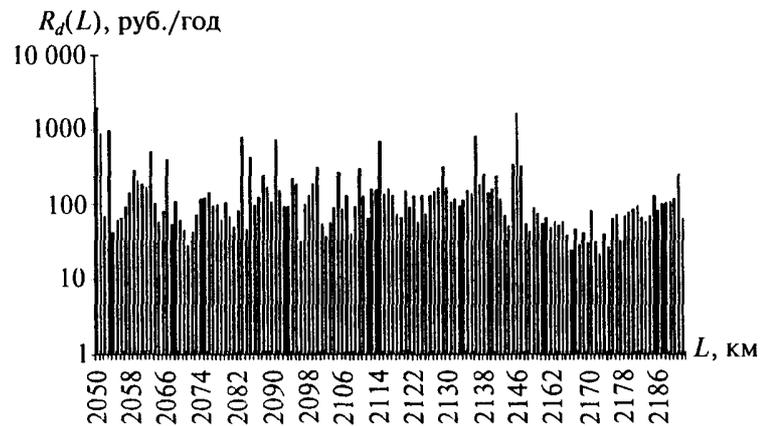


Рис. 4. Распределение ожидаемого ущерба $R_d(L)$ по трассе магистрального нефтепровода

Приложение 2

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КАТАСТРОФЫ НА ТЕРРИТОРИИ КРУПНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА

Лотош В.Е., д-р техн. наук, профессор

В работе дана оценка социальных и материальных потерь при возникновении чрезвычайной ситуации (ЧС) на железнодорожном транспорте, выполненная на примере Екатеринбурга – города с населением порядка 1,4 млн. человек. Применительно к нему институт «Уралгипротранс» анализирует целесообразность замены существующего радиального маршрута перевозок товарных грузов (ст. ВИЗ – ст. Свердловск-Пассажирский – п.о. Первомайская – ст. Шарташ) на вариант движения по так называемому обводному пути (ст. ВИЗ – ст. Звезда – ул. Восточная – район ул. Малышева-Высоцкого). Ныне действующий маршрут пролегает через густонаселенную территорию города, особенно в районе станции Свердловск-Пассажирский. Обводная магистраль в значительной степени проходит по окраинам Екатеринбурга. В настоящее время она является однопутной. Ее как альтернативу реальному пути предлагается реконструировать в двухпутную. Автор был приглашен «Уралгипротрансом» для оценки возможных экономических последствий принятия альтернативного варианта.

Точная экономическая оценка последствий еще не состоявшегося ЧС представляется практически невозможной. Прежде всего, это объясняется тем, что проявление неблагоприятного события имеет вероятностный характер, его последствия для объекта также случайны. Экономический результат ЧС зависит от множества факторов и в случае, например, взрыва и/или загрязнения ядовитыми веществами определяется их масштабом и интенсивностью, характером (рельефом) территории, плотностью ее застройки, типом зданий и сооружений, плотностью населения, его возрастным составом и т.д.

Последствия ЧС выражаются такими факторами, как число пострадавших (погибших, раненых, инвалидов), масштабы разрушения и загрязнения промышленной и гражданской застройки, окружающей среды (ОС) и др.

Соответственно можно различить следующие ущербы, или последствия, ЧС: социальные, связанные со снижением уровня здоровья и повышением смертности населения; экологические (ухудшение состояния ОС); материальные (затраты на восстановление разрушенных и возведение новых гражданских, административных, промышленных зданий и сооружений и пр.).

Часто за основной критерий масштаба (тяжести) природных катастроф и аварий принимается число пострадавших. В МЧС РФ по этому критерию ЧС подразделяют на локальные (число пострадавших менее 10 человек), местные (10-50), территориальные (50-100), региональные (100-200), федеральные (более 200) [1].

ЧС, по определению, относятся к числу очень редких событий, которые происходят не каждый год. В нашем случае имеются в виду крупные техногенные катастрофы с тяжелыми последствиями, связанными с железнодорожными перевозками сильнодействующих ядовитых (СДЯВ) и взрывчатых (ВВ) веществ. Поскольку такие события достаточно редки, то даже имеющаяся статистическая информация о частоте их проявления и нанесенном ущербе, в том числе за длительный период (десятилетия), не позволяет получить достоверную оценку соответствующей вероятности. Существующая статистика мало чем может помочь и при оценке предельной величины ущерба [1].

Трудности оценки ущерба от ЧС, связанные с неопределенностью их вероятности и масштаба, частично можно преодолеть при оценке ущерба единичного ЧС с заданными параметрами (число пострадавших, масштабы максимального ущерба) и сопоставлении полученного ущерба с затратами на его предотвращение. Этот подход использован и в нашей работе.

За величину предотвращенного ущерба приняты экономические потери, которые в случае ЧС будут получены на радиальном маршруте за вычетом ущерба при таком же событии на обводном пути.

Экологический ущерб по существующему и предлагаемому вариантам можно считать равным (одинаковая степень загрязнения атмосферы и почвы при практическом его отсутствии для водного бассейна), поэтому оценивались только предотвращенные социальные и материальные ущербы. Их сумма составляет положительный эффект обводного варианта. Сопоставление положительного эффекта со стоимостью прокладки второй железнодорожной колеи позволяет в принципе оценить целесообразность предлагаемого решения.

В основу расчета предотвращенного социального ущерба была положена приводимая далее оценка социального ущерба от гибели и инвалидности одного индивида.

Используемые в настоящее время методы оценки социального ущерба являются некоторым более или менее обоснованным приближением к действительному значению. На практике часто ущерб полагают обоснованным, если с его величиной (и методом расчета соответственно) согласны все заинтересованные стороны. Если согласны не все, то достоверность метода должна быть подтверждена правом (законом, постановлением, арбитражным судом) или иным допустимым способом. Весьма часто ориентируются на подходы и методы (методики), в той или иной степени согласованные и одобренные органами управления различных народнохозяйственных уровней (государственных, территориальных, отраслевых) [1]. Каких либо общепринятых утвержденных методик оценки социального ущерба от ЧС нет.

Вместе с тем существует определенное согласие относительно некоторых факторов, влияющих на величину социального ущерба. Так, основной характеристикой при оценке его размеров служит продолжительность потерянного времени. Например, в случае смерти это разница между среднеожидаемой продолжительностью жизни и фактически прожитой. В ча-

стности, по оценкам различных организаций (международной комиссии по радиационной защите, ВОЗ и др.), средние потери времени в результате преждевременной смерти из-за несчастного случая на производстве составляют около 30-35 лет, из которых около 20-25 приходится на трудоспособный возраст.

Стоимость потерь времени определяется на основе ряда альтернативных концептуальных предположений, например, величине потерь дохода; по уровню платы, которую человек готов внести, чтобы избежать этих потерь (метод готовности платить); по уровню затрат в общественном секторе на обеспечение нормальной жизнедеятельности в рассматриваемый период; по методу «страхования жизни»; с использованием показателя «цена времени» и на основании ряда других подходов.

Автором для оценки социального ущерба в случае преждевременной смерти использованы такие понятия, как валовая стоимость (ВС) жизни, потребительские расходы (ПР), нетто-стоимость (НС) жизни [1].

Под валовой стоимостью здесь понимается валовой внутренний продукт (ВВП), создаваемый в течение одной человеческой жизни.

Под потребительскими подразумеваются расходы, необходимые для поддержания жизни человека. В общем случае они равны доле заработной платы в ВВП, увеличенной на сумму доходов, ею не учитываемых.

Нетто-стоимость жизни представляет собой разницу между ВВП и ПР и является доходом, создаваемым человеком для общества.

Для оценки использованы результаты, в необходимых случаях пересчитанные, работ [2-7] и некоторых других.

Привлечение ВВП при оценке ущерба от ЧС в г. Екатеринбурге вполне обоснованно, поскольку основные экономические показатели (выработка и доход на одного занятого) близки к средним по России. Последние регулярно публикуются в различных источниках, включая зарубежные, что повышает их достоверность. Кроме того, в принятой методике расчетный социальный ущерб от преждевременной смерти или инвалидности без права работы (первая и, обычно, вторая группы) одинаков. Ущерб, нанесенный инвалидностью третьей (рабочей) группы в сравнении с первой и второй группами, невелик: пособие выплачивается в течении ограниченного времени (не более 5 лет) и по доле от заработной платы незначительно.

Основные исходные данные для расчета (2000 г.) [2-7]:

Численность населения России 145 млн. чел;

Численность занятых в народном хозяйстве 65 млн. чел;

Число пенсионеров 38 млн. чел;

Число работающих пенсионеров 8 млн. чел;

Средняя продолжительность жизни: для мужчин 64 года, женщин 76 лет;

Возраст дожития после шестидесятилетия – 18 лет;

Доля женщин в населении 52%;

ВПП России: по паритету покупательной способности (ППС) 1265 млрд. дол./год; по текущему курсу валют (КВ) 246,9 млрд. дол./год;

Валютный курс 28,1 руб./дол. по КВ;

ППС/КВ = 1265/246,9=5,12;

Руб./\$ ППС = 246,9 · 28,1 / 1265≈5,5;

ВВП по ППС 8,7 тыс. дол./чел;

Выработка ВВП по ППС на одного занятого 19,5 тыс. дол., или 107 тыс. руб.;
 Доля зарплаты в ВВП 30%;
 Потребительские расходы одного человека допенсионного возраста по фонду з/п:

$8,7 \cdot 0,3 = 2,6$ тыс. дол./год по ППС или 14,4 тыс. руб./год (1200 руб./мес.); по-

требительские расходы пенсионера равны 80% от допенсионных;
 Дополнительные расходы (легальные и нелегальные доходы) до 30% семейных доходов;
 Общие потребительские расходы: $14,4/0,7 = 20,6$ тыс. руб./год (1720 руб./мес.);
 Рост q ВВП 4% ежегодно.

В расчетах приняты следующие допущения:

1. Три возрастные группы населения: А. Допрофессиональная (1-20 лет); Б. Профессиональная (21-60 лет для мужчин, 21-55 лет для женщин); В. Пенсионеры (лица старше профессионального возраста);

2. Количественное распределение людей по возрастным группам пропорционально временной продолжительности последних, т.е. составляет 1:2:1 соответственно для допрофессионалов, профессионалов и пенсионеров. Это допущение тем более приемлемо, что в реальных условиях часть лиц профессиональной возрастной группы выходит на пенсию на 5-10 лет раньше, чем по общему законодательству (1 и 2-й списки работников с тяжелыми и вредными условиями труда), повышая число пенсионеров до вышесказанного 1:2:1;

3. Равная возможность гибели в результате ЧС в любом i -том году жизни человека (для пенсионеров – с учетом возраста дожития);

4. Гибель наступает при достижении среднего возраста в группе, т.е. в 10; 37,5 (40) и 67 (69) лет (в скобках – возраст мужчин);

5. Поскольку ВВП ежегодно увеличивается на величину q по отношению к предыдущему году (4%), то ВВП i -го года является i -тым членом геометрической прогрессии, а валовая стоимость человеческой жизни равна сумме членов геометрической прогрессии за рассматриваемый период (годы). При конечном числе n лет [8]:

$$ВВП_n = ВВП_1 \cdot q^{n-1}, \quad (1)$$

$$BC = \frac{ВВП_1}{q-1} * (q^n - 1), \quad (2)$$

где $q=1,04$.

6. ЧС произошло в 2000, 2010, 2020 гг., его экономические последствия выражены в ценах 2000 г.

Рассмотрим результаты расчетов по возрастным группам.

Допрофессиональная группа. Гибель в возрасте 10-ти лет означает, что потерян весь будущий ВВП несостоявшегося работника в профессиональном периоде, причем в равной степени это может быть мужчина или женщина. Однако до достижения профессионального возраста должно пройти 10 лет. Отсюда следует, что если летальный исход состоялся в 2000 г., то профессиональный возраст наступил бы в 2010 г. и продолжился 40 лет для мужчины и 35 – для женщины. Отсюда в соответствии с выражениями (1) и (2):

$$ВВП_{2010} = ВВП_{2000} * q^{n-1} = ВВП_{2000} * 1,04^{10-1},$$

$$BC_{2010} = \frac{0,5 * 107 * 1,04^{40} - 1 * (1,04^{40} - 1)}{1,04 - 1} = 7,2 \text{ млн. руб.}$$

где 107 – выработка на одного занятого в 2000 г., тыс. руб;

0,5 – вероятность гибели мужчины при одном пострадавшем в группе.

Аналогичный расчет для женщин при стаже 35 лет дает BC₂₀₁₀, равный 5,6 млн. руб.

Суммарная потеря BC₂₀₁₀ в случае гибели 1 человека в допрофессиональном возрасте составит 7,2 + 5,6; т.е. 12,8 млн. руб.

Выполнив аналогичные оценки для ЧС₂₀₁₀ и ЧС₂₀₂₀, получим BC₂₀₂₀ и BC₂₀₃₀ соответственно 18,2 и 25,8 млн. руб.

Создавая BC, работник несет в рассматриваемом случае ПР «на свое содержание» в течение допрофессионального и профессионального периодов жизни. Доля ПР в ВВП и, следовательно, в BC, в соответствии с исходными данными, составляет 20,6/107, или 0,192. Отсюда следует, что применительно к ЧС 2000, 2010, 2020 ПР равны соответственно 2,5; 3,5 и 5,0 млн. руб. Нетто-стоимости как разность между BC и ПР для этих же лет равны 10,3; 14,7 и 20,8 млн. руб.

Профессиональная группа. Расчеты аналогичны выполненным выше, при этом в ЧС, в соответствии с количественным распределением людей по возрастным группам, погибают один мужчина и одна женщина.

Для ЧС₂₀₀₀ :

$$BC_M = \frac{0,71 * 107 * (1,04^{20} - 1)}{1,04 - 1} = 2,3 \text{ млн. руб.}$$

Здесь 0,71 – доля занятых мужчин в профессиональной группе; 20 – продолжительность недоработанного времени, лет.

Доля занятых определена в допущении, что количество мужчин и женщин в любом i-том году от рождения до смерти одинаково, а их общая численность есть разность между числом работников в народном хозяйстве (65 млн.) и числом работающих пенсионеров (8 млн.), или 58 млн. чел. Вместе с тем поскольку профессиональный стаж занятого мужчины 40, а женщины 35 лет, то количество работающих мужчин составля-

ет 58·40/75 или 30,9 млн. чел. (здесь 75=45+30). Общее же количество их равно

145·0,48·40/64, или 43,5 млн. чел (здесь 145 – численность населения страны; 0,48 – доля

мужчин в населении, 40 – временной интервал их профессиональной группы; 64 – средняя продолжительность жизни мужчин). Исходя из этих данных, доля мужчин в профессиональной группе составляет 30,9/43,5 или 0,71.

Выполнив аналогичные расчеты для женщин, получим число занятых равным (58-30,9),

или 27,1 млн. чел. Общее число женщин профессиональной группы составит 145·0,52·35/76,

или 34,7 млн. чел. Отсюда доля занятых женщин 27,1/34,7, или 0,78.

Следовательно, при равной производительности с мужчинами:

$$BC_{ж} = \frac{0,78 * 107 * (1,04^{17,5} - 1)}{1,04 - 1} = 2,1 \text{ млн. руб.}$$

Здесь 17,5 – середина временного интервала для женщин профессиональной группы, соответствующая моменту ЧС.

Очевидно, что $BC_{общ.} = BC_{м.} + BC_{ж.}$

Применительно к ЧС₂₀₀₀ $BC_{общ.} = 2,3 + 2,1$, т.е. 4,4 млн. руб. Аналогичным образом рассчитанные $BC_{общ.}$ для ЧС₂₀₁₀ равны 6,2 млн руб, ЧС₂₀₂₀ – 8,9 млн. руб.

Поскольку ежегодные потребительские расходы лиц в допрофессиональном и затем в профессиональном возрасте вплоть до выхода на пенсию приняты одинаковыми (п. 15 исходных данных) и применительно к ЧС 2000, 2010, 2020 г. равны соответственно 2,5; 3,5 и 5,0 млн. руб., то НС: 2000 г. – (4,4-2,5), или 1,9 млн. руб.; 2010 – (6,2-3,5), или 2,7 млн. руб.; 2020 г. – (8,9-5), или 3,9 млн. руб.

Пенсионеры. Эта группа представлена работающими (8 млн.) и неработающими (30 млн.) при общей ее численности 38 млн. чел. Работающие пенсионеры за счет большего опыта, высокой квалификации (повышенная доля лиц интеллектуального труда) создают, надо полагать, ВВП, не уступающий среднему ВВП в допрофессиональном возрасте. Доля этих лиц в группе составляет 8/38, или 0,2. При возрасте дожития для 60-летних, равном 18 годам,

среднее число лет работы пенсионера-мужчины достигает 18*0,2, т.е. 3,6 г., а женщины

23*0,2, или 4,6 г. Безотносительно к полу, примем общее число лет работы пенсионера соот-

ветствующим 4 годам. Тогда при ЧС₂₀₀₀ потери, связанные с гибелью одного пенсионера:

$$BC = \frac{107 * (1,04^4 - 1)}{1,04 - 1} = 0,45 \text{ млн. руб.}$$

Рассчитанные аналогичным образом BC_{2010} и BC_{2020} составляют 0,65 и 0,95 млн. руб.

Потребительские расходы пенсионера (80% от необходимого в допенсионном возрасте),

в 2000 г. достигли бы 20,6*0,8 или 16,5 тыс. руб. Следовательно:

$$PR_{м} = \frac{0,5 * 16,5 * (1,04^{18} - 1)}{1,04 - 1} = 0,23 \text{ млн.}$$

$PR_{ж}$ отличаются показателем степени при 1,04 (равен 23) и составляют 0,34 млн. руб. (здесь 18 и 23 – возраст дожития и 0,5 – вероятность гибели мужчины или женщины).

$$\sum PR = 0,23 + 0,34 = 0,57 \text{ млн. руб.}$$

Соответственно оценки PR_{2010} и PR_{2020} дают 0,8 и 1,5 млн. руб.

Полученные данные приводят к интересному выводу: работающие пенсионеры обеспечивают PR всех пенсионеров примерно на 80%. Таким образом, пенсионеры практически сами себе выплачивают пенсию из BC , зарабатываемой в пенсионном возрасте.

Вместе с тем гибель в ЧС пенсионера, достигшего середины возрастного диапазона группы (69 лет для мужчин и 66,5 г. для женщин), означает, что он до этого события успел выработать всю ВС, а его ПР составил:

$$ПР_{2000,м} = \frac{0,5 * 16,5 * (1,04^9 - 1)}{1,04 - 1} = 0,09 \text{ млн.руб.}$$

$$ПР_{2000,ж} = \frac{0,5 * 16,5 * (1,04^{11,5} - 1)}{1,04 - 1} = 0,12 \text{ млн.руб.}$$

Тогда $\Sigma НС_{2000} = ВС_{2000} - ПР_{2000} = 0,45 - 0,09 - 0,12 = 0,24$ млн. руб.

НС для 2010 и 2020 гг. возрастает соответственно в 1,42 и 2,02 раза.

Таким образом, гибель пенсионера увеличивает его НС, не снижая выработанного им ВП.

Результаты расчетов для случая равновероятной гибели 1 чел. в любом i -том году его жизни представлены в таблице. Суммы ВС, ПР и НС включают 25% сумм допрофессионального, 50% профессионального и 25% пенсионного возраста.

Таблица

Величины валовой и нетто-стоимости, потребительских расходов, теряемых при гибели одного человека в чрезвычайной ситуации, млн. руб.

Показатель	Время ЧС, год		
	2000	2010	2020
ВС	5,5	7,8	11,2
ПР	1,9	2,8	3,9
НС	3,6	5,0	7,2

Представляет интерес сопоставление полученных данных по оценке ущерба от гибели людей с результатами других источников.

Известно, что в развитых странах оценки жизни по величине дохода составляют 200-400 тыс.дол. [1]. В нашем расчете аналогом дохода служат ПР. В 2000 г. они составили 1,9 млн. руб. на 1 человека (таблица), или 345 тыс. дол. по ППС, что является величиной того же порядка, что и в развитых странах.

Более адекватно отражает, по нашему мнению, ущерб от гибели человека величина НС, которая, по определению, исключает потребительские расходы человека и, таким образом, является доходом, создаваемым им для общества. В наших расчетах НС₂₀₀₀ составляет 3,6 млн руб./чел, возрастая вдвое к 2020 г. (таблица). Величина НС₂₀₀₀ принята для оценки общей величины ущерба для ЧС₂₀₀₀.

Рассчитанные величины потерь ВС, ПР и НС, сопровождающие гибель одного человека, позволяют оценить экономические последствия строительства второго пути на обводном участке. Они включают снижение ущерба от воздействия СДЯВ и сокращение социальных и материальных потерь от взрыва.

Снижение социального ущерба от воздействия СДЯВ. В этой части оцениваются последствия ЧС, повлекшего разрушение одной пятидесятитонной цистерны с аммиа-ом или хлором. Эффект от предполагаемого строительства подсчитывается как разность в максимальных ущербах, наносимых единичным ЧС при транспортировке грузов по существующему маршруту и по обводной линии.

При воздействии СДЯВ наносимый ущерб становится, прежде всего, социальным и выражается числом смертельных случаев и инвалидностей 1-ой и 2-ой групп. Однако в расчете учтены только летальные исходы, поскольку отсутствуют методики оценки количества инвалидов указанных групп в общем числе пострадавших. В соответствии с дан-

ными [9] для оценки ущерба приняты следующие максимальные показатели ЧС с аммиаком и хлором.

Показатели:	NH ₃	Cl ₂
Число лиц в зоне смертельных концентраций:		
Существующий вариант, чел. (ст. Свердловск-Пас.)	11728	163940
Предлагаемый вариант, чел. (ст. Восточная для NH ₃ и ст. Звезда для Cl ₂)	1440	105876
Вероятность гибели, %	35	35
Разница в числе погибших, чел.	805	16830

Отсюда предотвращенный общий социальный ущерб Σ НС предлагаемого решения равен НС единичной смерти, умноженной на разницу в числе погибших. Он составляет, млрд. руб.:

	ЧС ₂₀₀₀	ЧС ₂₀₁₀	ЧС ₂₀₂₀
NH ₃	13	18	25,9
Cl ₂	73,2	101,6	146,3

Стоимость строительства второго пути (капвложения К) составляет 17,82 млн. руб. в ценах 1984 г. или 534 млн руб. в ценах 2000 г. (повышающий коэффициент – 30). Капитальные затраты достигают обычно 20-30% от текущих затрат (С). Приняв их равными 25%, находим, что текущие затраты для ЧС₂₀₀₀ составят 2,14 млрд. руб.

Срок окупаемости Т вложений в строительство второго пути применительно к анализируемому случаю для реципиента (общества):

$$T = \frac{K}{\Sigma_{НС-С}}; \quad (4)$$

отсюда для ЧС₂₀₀₀:

$$T_{NH_3} = \frac{0,534}{13 - 2,14} = 0,05 \text{ г.} = 18 \text{ сут.}$$

$$T_{Cl_2} = \frac{0,534}{73,2 - 2,14} = 0,075 \text{ г.} = 2,7 \text{ сут.}$$

Таким образом, затраты, связанные со строительством второго пути, за счет снижения ущерба при воздействии СДЯВ в единичном ЧС окупаются чрезвычайно быстро. Фактически указанные сроки будут меньше, так как в расчетах не учтены пострадавшие, ставшие инвалидами.

Сроки окупаемости капвложений при ЧС₂₀₁₀ и ЧС₂₀₂₀ еще более сжаты за счет увеличения НС со временем.

Сокращение социальных и материальных потерь от взрыва. Последствия ЧС оценены для катастрофы с ВВ массой 30 т (один вагон) или одной цистерной с пропаном/бензином. Ущерб носит социальный (погибшие люди, нетрудоспособные инвалиды: первая и, частично, вторая группы) и материальный (разрушенные здания и сооружения) характер.

Нами принято, что при существующем варианте движения составов с опасными грузами максимальное поражение произойдет при взрыве в районе п.о. Первомайская: 8640 погибших и нетрудоспособных инвалидов, 37 разрушенных или не подлежащих восстановлению домов.

На предлагаемой обводной линии максимальный ущерб может быть нанесен в районе ул. Малышева-Высоцкого: 3120 погибших и нетрудоспособных, 14 разрушенных или не подлежащих восстановлению домов.

Таким образом, ущерб, предотвращаемый строительством второго пути на обводной линии, составит 5520 чел. и 23 дома.

Предотвращенный общий социальный ущерб Σ НС предлагаемого решения равен НС одного человека, умноженной на разность в числе погибших и инвалидов. Для ЧС2000, 2010,2020 он соответствует 10,9; 28,2 и 40 млрд. руб. пппппппртрь При оценке материального ущерба принято, что городская застройка представлена 5-этажными домами, состоящими из 80-ти 2х-комнатных квартир общей площадью 45 м² каждая; рыночная стоимость 1 м² жилой и иной площади для Екатеринбурга равна 350 дол. США. При курсе доллара на уровне 28,1 руб. (в ценах 2000 г.), стоимость потерянной общей площади:

$$23 \cdot 80 \cdot 45 \cdot 350 \cdot 28,1 = 814 \text{ млн. руб.}$$

Общий ущерб, предотвращаемый предлагаемым строительством, для ЧС₂₀₀₀ равен $19,9 + 0,80 = 20,7$ млрд. руб. Таким образом, очевидно, что материальный ущерб в общей его сумме весьма мал, не превышая нескольких процентов, или, точнее, 3,8%.

Срок T окупаемости капвложений в строительство второго пути, рассчитанный для реципиента (общества) по выражению (3), применительно к ЧС2000 составит:

$$T = 14,27,20534,0 = 0,029 \text{ г., или } 10,5 \text{ сут.,}$$

где 0,534 – капитальные затраты на строительство второго пути, млрд. руб.; 2,14 – эксплуатационные затраты для того же пути, млрд. руб.

Выводы

На примере г. Екатеринбурга выполнена экономическая оценка социальных и материальных потерь в результате возможной железнодорожной катастрофы на территории крупного регионального центра при существующем радиальном маршруте перевозок грузов и на предлагаемом обводном пути. Экономическая эффективность принята как разность максимальных социальных и материальных потерь при существующем и предлагаемом вариантах.

Социальные потери оценивали как произведение нетто-стоимости НС человеческой жизни на число погибших, материальные – как стоимость площади полностью разрушенных или не подлежащих восстановлению зданий и сооружений (порядка 10 тыс. руб./м²).

Предметом расчета были следующие ЧС: разрушение одной пятидесятитонной цистерны с хлором или аммиаком, взрыв вагона с 30 т ВВ или одной цистерны с пропаном/бензином. Принятое время ЧС: 2000, 2010 и 2020 гг.

На основании новейших статистических данных рассчитанная НС человеческой жизни составила для ЧС2000 3,6 млн. руб. в ценах 2000 г.

Выявлено, что сокращение социального ущерба при реализации предлагаемого решения применительно к ЧС2000 равно, млрд. руб.:

при катастрофе с хлором – 73,2;

то же, с аммиаком – 13;

при взрыве – 19,9

Материальный ущерб от разрушения зданий и сооружений взрывом составит 0,8 млрд. руб.

При капитальных затратах 534 млн руб. на строительство второго пути по обводной линии они, при хотя бы единичном ЧС2000, окупятся в чрезвычайно короткие сроки: в зависимости от вида ЧС – за 2,7-18 суток, т.е. менее чем за 1 мес.

Применительно к ЧС2010 и ЧС2020 эффективность предлагаемого технического решения будет возрастать в 1,4 раза через каждые 10 лет по отношению к ЧС2000.

Экстраполируя нынешний уровень цен, жертв и разрушений в будущее, можно утверждать, что затраты, связанные со строительством второго пути по обводной линии, окупаемы даже в том случае, если катастрофа состоится один раз в несколько сотен или тысяч лет, т.е. в любой реально просчитываемый период времени.

Литература

1. Тихомиров Н.П., Тихомирова Т.М. Эколого-экономические риски: методы определения и анализа // Экономика природопользования. – 2002. – № 6. – С. 2-109.
2. Болотин Б. Мировая экономика за 100 лет // Мировая экономика и международные отношения. – 2001. – № 9. – С. 90-114.
3. Болотин Б. Неоднородность современного мира // Мировая экономика и международные отношения. – 2000. – № 8. – С. 121-128.
4. Илларионов А. Экономическая политика в условиях открытой экономики со значительным сырьевым сектором // Вопросы экономики. – 2001. – № 4. – С. 4-31.
5. Кудров В., Тремль В. Достоинства и недостатки западной экономической советологии // Вопросы экономики. – 2000. – № 11. – С. 64-78.
6. Обзор основных тенденций российской экономики // Вопросы экономики. – 2002. – № 5. – С. 39-83.
7. Ясин Е. Перспективы российской экономики: проблемы и факторы роста // Вопросы экономики. – 2002. – № 5. – С. 4-25.
8. Гусев В.А., Мордкович А.Г. Математика. – М.: Просвещение, 1988. – 416 с.

