

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»  
филиал КузГТУ в г. Белово

Кафедра Горного дела и техносферной безопасности

## **НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Методические указания к выполнению практических работ  
для обучающихся направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность»  
всех форм обучения

Составитель В. Ф. Белов

Рассмотрены на заседании кафедры

Протокол № 3 от 08.10.22 г. \_\_\_\_\_

Рекомендованы учебно-методической  
комиссией направления 20.03.01  
«Техносферная безопасность» в качестве  
электронного издания для использования в  
образовательном процессе

Протокол № 1 от 11.10.22 г. \_\_\_\_\_

## **ВВЕДЕНИЕ**

Освоение дисциплины направлено на формирование:  
универсальных компетенций:

УК-8 - Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов.

УК-9 - Способен использовать базовые дефектологические знания в социальной и профессиональной сферах.

общефессиональных компетенций:

ОПК-2 - Способен обеспечивать безопасность человека и сохранение окружающей среды, основываясь на принципах культуры безопасности и концепции риск-ориентированного мышления.

Выполнение 5 практических работ, затрагивает основные разделы дисциплины, позволяет студентам получить достаточно полное представление о требованиях безопасности, выполнение которых гарантирует сохранение жизни и здоровья человека, повышение производительности труда и работоспособности.

Практические работы предполагают самостоятельную работу студентов по освоению лекций и дополнительной литературы при подготовке к ним. Текущий контроль знаний осуществляется путем оформления студентами отчета по практическим работам.

### **Перечень практических работ**

1	Порядок проведения анализа техногенного риска на опасных объектах.
2	Методы проведения анализа риска опасных производственных объектов
3	Применение статистических методов обработки информации о надежности технических систем
4	Определение интенсивности негативных проявлений при работе технических систем
5	Анализ техногенного риска построением дерева отказов и дерева событий

## Критерии оценки практической работы

Формирование у студента знаний, необходимых в области охраны труда и промышленной безопасности на опасном производственном объекте;

**Знать:** методы обработки информации о надежности оборудования; элементы теории вероятности для оценки риска нежелательных событий; виды рисков, возникающих при работе технических систем;

**Уметь:** проводить исследования показателей надежности технических систем; проводить анализ развития аварийных ситуаций; планировать основные мероприятия по снижению риска аварий на предприятиях;

**Владеть:** навыками определения показателей долговечности и сохраняемости; навыками расчета вероятности реализации отказов в сложных технических системах; методами снижения риска возникновения аварийных ситуаций. владение материалом при защите и сдаче выполненных лабораторных работ при собеседовании с преподавателем:

соблюдение правил техники безопасности;

своевременность сдачи отчетов.

Критерии оценивания при подготовке, представлении и защите отчетов по лабораторным работам:

- в отчете содержатся все требуемые элементы, и произведены ответы на два вопроса – 65...100 баллов;

- в отчете содержатся все требуемые элементы, однако не произведены ответы на два вопроса, или представлены не все требуемые элементы, или отчет не представлен – 0...64 баллов.

Количество баллов	0...64	65...100
Шкала оценивания	Не зачтено	Зачтено

## Практическая работа № 1

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА ТЕХНОГЕННОГО РИСКА НА ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** ознакомиться с основными этапами анализа техногенного риска на опасных объектах.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.** В процессе выполнения работы студенты должны:

- ознакомиться с основными терминами и определениями анализа риска;
- изучить, какие производственные объекты являются опасными;
- ознакомиться с задачами анализа риска;
- изучить основные этапы анализа риска;
- ответить на два контрольных вопроса.

#### 1. Основные термины и определения

Анализ риска является важнейшей частью мероприятий, позволяющих предупредить или уменьшить опасность возникновения техногенных аварий на опасных промышленных объектах, что способствует снижению вероятности гибели или травматизма людей, а также уменьшению экономического ущерба имуществу и окружающей среде.

При анализе техногенных рисков используются следующие термины и определения.

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 21.07.1997 № 116-ФЗ).

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.

3. **Идентификация опасностей аварии** – процесс выявления и признания, что опасности аварии на опасном производственном объекте существуют, и определения их характеристик.

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.

**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 21.07.1997 № 116-ФЗ.

**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.

**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.

**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.

**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).

**10. Ущерб от аварии** – потери (убытки) в производственной и непромышленной сфере жизнедеятельности человека, вред окружающей природной среде, причиненные в результате аварии на опасном производственном объекте и исчисляемые в денежном эквиваленте.

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.

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.

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.

## **2. Порядок проведения анализа риска**

## **Основные этапы анализа риска**

Процесс проведения анализа риска включает следующие основные этапы:

- планирование и организацию работ;
- идентификацию опасностей;
- оценку риска;
- разработку рекомендаций по уменьшению риска.

### **Планирование и организация работ**

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.

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.

Цели и задачи анализа риска могут различаться и конкретизироваться на разных этапах жизненного цикла опасного производственного объекта.

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.

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).

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.

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 Рос-технадзором России или иными федеральными органами исполнительной власти.

На этапе планирования выявляются управленческие решения, которые должны быть приняты, а также требующиеся для этого исходные и выходные данные.

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.

## **Идентификация опасностей**

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.

При идентификации следует определить, какие элементы, технические устройства, технологические блоки или процессы в технологической системе требуют более серьезного анализа, а какие представляют меньший интерес с точки зрения безопасности.

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 риска.

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 (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.

## Оценка риска

Основными задачами этапа оценки риска являются:

– определение частот возникновения инициирующих и всех нежелательных событий;

– оценка последствий возникновения нежелательных событий;

– обобщение оценок риска.

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.

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.

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.

### **Разработка рекомендаций по уменьшению риска**

Разработка рекомендаций по уменьшению риска является заключительным этапом анализа риска. В рекомендациях представляются обоснованные меры по уменьшению риска, основанные на результатах оценок риска.

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.

На стадии эксплуатации опасного производственного объекта организационные меры могут компенсировать ограниченные возможности для принятия крупных технических мер по уменьшению риска.

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.

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.

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.

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.

### **3. Требования к оформлению результатов анализа поиска**

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.

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.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Назовите, что такое авария?
2. Какие этапы включает анализ риска?
3. Какие цели и задачи имеет анализ риска?
4. Что предусматривает этап идентификации опасностей ?
5. Какие задачи имеет этап оценки риска?
6. Какие основные меры предусматривает этап разработки рекомендаций по уменьшению риска?
7. Какие требования предъявляются к оформлению анализа риска?
8. Что такое опасность аварии?
9. Что такое оценка риска аварии?

## Практическая работа №2

### МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА РИСКА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** освоить методы проведения анализа техногенного риска на опасных производственных объектах.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.** В процессе выполнения работы студенты должны:

- ознакомиться с видами аварий на опасных производственных объектах;
- ознакомиться с основными методами проведения анализа риска;
- изучить цели и задачи проведения анализа риска;
- ознакомиться с количественными методами проведения анализа риска;
- ответить на два контрольных вопроса.

#### 1. Виды аварий на опасных производственных объектах

В зависимости от отраслей промышленности и видов надзора различают различные типы аварий. Ниже представлен примерный перечень аварий, который приведен в Положении о порядке технического расследования причин аварий на опасных производственных объектах, учитывающий отраслевую специфику.

По **металлургической** промышленности:

- взрывы газа в воздухонагревателях и межконусном пространстве доменных печей, аппаратах газоочистки, газгольдерах, газодувках, на генераторных станциях, газораспределительных и газоповысительных установках, на водородных станциях, в агрегатах и установках улавливания и переработки коксового газа, в аппаратах производства хлора, карбонила, никеля, трихлорарсина, тетрахлорида титана;
- взрывы металлических порошков в пылесадительных камерах и печах восстановления;
- пожары в галереях шихтоподачи, складах угля и легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ);
- пожары от загорания металлических порошков;
- пожары от выбросов, расплавленных и раскаленных материалов из металлургических агрегатов;
- пожары на кислородных станциях и установках;

- обрушение трубопроводов с ЛВЖ, горючими и ядовитыми газами;
- уходы расплавленных и раскаленных материалов из металлургических агрегатов;
- прогары горна, фурменных и ленточных холодильников доменных печей;
- обрушение шихтовых бункеров, транспортных галерей, силосных башен, производственных зданий и сооружений, шламохранилищ и другие аварии, требующие остановки основных агрегатов для проведения ремонтов.

**По химической промышленности:**

- взрывы, загорания и (или) выбросы опасных веществ;
- разрушения сооружений, технических устройств или их элементов.

**По подъемным сооружениям:**

- разрушение или излом металлоконструкций грузоподъемной машины (моста, портала, рамы, платформы, башни, стрелы, опоры, гуська), вызвавшие необходимость в ремонте металлоконструкций или замене их отдельных секций, а также падение грузоподъемной машины, вызвавшее указанные разрушения;
- падение кабины лифта, его противовеса;
- разрушение ответственных металлоконструкций, обрыв цепей эскалатора, разрушение ответственных металлоконструкций кабины (вагонетки) вагона, обрыв канатов канатной дороги, фуникулера;
- разрушение металлоконструкций стрелы и ходовой рамы подъемника (вышки), разрушение или падения крана – манипуляторной установки крана-манипулятора, разрушение или падение выносной консоли или самого крана-трубоукладчика;
- повреждение металлоконструкций (изгиб, деформация) подъемных сооружений (или их элементов), приведшее к травмированию людей.

**По объектам котлонадзора:**

- разрушения и повреждения (разрывы) котлов, сосудов, работающих под давлением, трубопроводов пара и горячей воды (их элементов).

**По объектам газоснабжения:**

- разрушения газопроводов, выход из строя газового оборудования газораспределительных пунктов и газораспределительных установок, повлекших за собой взрывы газа в жилых домах, общественных зданиях, инженерных сооружениях, а также остановку (перерыв) газоснабжения

города, населенного пункта, микрорайона, предприятия (промышленного, коммунального, сельскохозяйственного);

- взрывы и пожары, связанные с эксплуатацией газового хозяйства, газонаполнительных и автозаправочных станций сжиженных газов, ГРЭС, ТЭЦ и районных отопительных котельных;

- взрывы газа в газифицированных печах, топках и газоходах котлов, агрегатах, вызвавших их местные разрушения или отключения;

- повреждения подземных газопроводов (механические, коррозионные и др.).

**По объектам магистрального трубопроводного транспорта:**

- неконтролируемый выброс транспортируемого газа в атмосферу или в помещение компрессорной станции, газораспределительной станции или автомобильной газораспределительной станции в результате полного разрушения или частичного повреждения трубопроводов, их элементов и устройств, сопровождаемого одним из следующих событий или их сочетанием:

- взрывом или воспламенением газа;

- повреждением или разрушением других объектов;

- потерей 10 000 м<sup>3</sup> газа и более.

**Авария на объекте магистрального трубопроводного транспорта опасных жидкостей:**

- внезапный вылив или истечение опасной жидкости в результате полного или частичного разрушения трубопровода, его элементов, резервуаров, оборудования и устройств, сопровождаемые одним или несколькими из следующих событий:

- воспламенением жидкости или взрывом её паров;

- загрязнением любого водостока, реки, озера, водохранилища или любого водоема сверх пределов, установленных стандартом на качество воды, вызвавшим изменение окраски поверхностной воды или берегов или приведшим к образованию эмульсии, находящейся ниже уровня воды, или к выпадению отложений на дне или берега;

- объём утечки составил 10 м<sup>3</sup> и более, а для легкоиспаряющихся жидкостей объём утечки превысил 1 м<sup>3</sup> в сутки.

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.

Основные задачи анализа риска аварий на опасных

производственных объектах заключаются в представлении лицам, принимающим решение: объективной информации о состоянии промышленной безопасности объекта; сведений о наиболее опасных, «слабых» местах с точки зрения безопасности; обоснованных рекомендаций по уменьшению риска.

## **2. Методы проведения анализа риска**

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 риска рекомендуется применять методы качественного анализа и оценки риска, опирающиеся на продуманную процедуру, специальные вспомогательные средства (анкеты, бланки, опросные листы, инструкции) и практический опыт исполнителей.

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.

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.

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.

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.

### **3. Основные количественные показатели риска**

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 индивидуальный 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**. 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.

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.

## 4. Характеристика методов анализа риска

Ниже представлена краткая характеристика основных методов, рекомендуемых для проведения анализа риска.

### 4.1. Методы «Что будет, если...?» («What – if?») и проверочного листа («Check List»)

Методы «Что будет, если...?» («What – if?») и проверочного листа («Check List») относятся к качественным экспертным методам и представляют собой формализованные процедуры изучения степени соответствия условий проектирования, строительства и эксплуатации

анализируемого объекта требованиям правил и норм в сфере обеспечения безопасности.

Использование метода «Что будет, если...?» («What – if?») предполагает ответы на перечень вопросов – что будет с объектом или его элементом, если реализуется конкретный вид нагрузок и/или воздействий, либо процесс или событие, способное инициировать аварии на объекте (ошибки персонала, несанкционированное техногенное воздействие на объект, старение материалов и т. д.). При этом вопросы «генерируются» в процессе анализа риска и определяются не только типом и классом объекта, но и специфическими особенностями его компоновки, условий размещения и функционирования. Ответы на вопросы должны отражать мнение экспертов в части оценки характера и масштабов ожидаемых повреждений.

«Как правило, это делает группа экспертов, включающая как лиц, ответственных за эксплуатацию объекта, так и специалистов в разных областях.

Результатом применения метода «Что будет, если...?» («What – if?») является таблица или иная форма регистрации полученной информации, содержащая, как правило, наименование объекта и его элементов, инициирующие опасные нагрузки, воздействия, процессы и события, характеристику повреждений объекта, вызываемых этими опасностями, а также качественную экспертную оценку последствий аварий для основных групп реципиентов риска – персонала, населения, имущества физических и юридических лиц и окружающей природной среды. Пример такой таблицы для гидротехнического сооружения (ГТС) приведен в табл. 1.

Таблица 1.

Примерный вид таблицы результатов применения метода «Что будет, если...?»

№ п/п	Наименование ГТС и его элементов	Причины повреждений и аварий ГТС	Характер и масштабы повреждений и аварий ГТС	Последствия для персонала, населения, имущества и окружающей среды
1.	Ограждающая дамба намывного золошлакоотвала	Некачественный дренаж на участке ПК13–ПК18	Повышение положения поверхности депрессии выше ПДЗ, потеря устойчивости низового откоса дамбы, обрушение участка дамбы, образование прорана	Вынос селя золошлаковых отходов за пределы отвала; остановка ТЭС; загрязнение территории вне ЗШО золошлаковыми отходами; существенное загрязнение водотоков территории; значительный экологический ущерб
2.	Водосбросной	Отказ колодца	Подъем уровня воды в	

колодец золошлакоотвала (резервный колодец отсутствует)	секции (засорение или потеря устойчивости конструкции)	или	секции выше отметки гребня ограждающей дамбы; перелив воды через гребень дамбы, образование прорана
--	--	-----	---

Примеры, приведенные в таблицах, носят иллюстрационный характер и служат для пояснения логики использования предлагаемых методов.

Метод проверочного листа («CheckList») отличается от метода «Что будет, если...?» («What – if?») более широким и полным представлением исходных данных и результирующей информации о последствиях опасных повреждений для основных групп реципиентов риска. Кроме того, в проверочном листе принято не только идентифицировать причины повреждений, их характер, масштабы и последствия, но и определять (на предварительном уровне) вероятность аварий, а также меры, необходимые для обеспечения безопасности объекта в каждом из рассматриваемых случаев. Пример применения метода проверочного листа для гидротехнических сооружений (ГТС) приведен в табл. 2.

Таблица 2

Примерный вид таблицы результатов применения  
метода проверочного листа

№ сценария	Наименование ГТС и его элементов	Причины возможных повреждений и аварий ГТС	Характер и масштабы возможных повреждений и аварий ГТС	Ожидаемая частота повреждений, 1/год	Последствия для персонала, населения, имущества и окружающей среды	Меры по предотвращению повреждений и аварий ГТС
1	Насыпная грунтовая плотина с бетонным водосливом	Отказ затворов водослива в период прохождения сверхрасчетного паводка	Повышение уровня воды в водохранилище до отметки гребня плотины, перелив через гребень плотины в зоне сопряжения с бетонным водосливом, образование прорана и волны прорыва	Крайне малая $P_{с.пав.} \cdot P_{отк.затв}$	Опорожнение водохранилища, затопление территории в нижнем бьефе, значительный социальный, материальный и экологический ущерб	Повышение гребня плотины в зоне сопряжения до проектной отметки, ремонт затворов
2.		Потеря фильтрационной прочности грунтов тела плотины вследствие наличия прослоек некачественных грунтов в теле плотины	Подъем поверхности депрессии выше ПДЗ, вынос грунта из тела плотины, обрушение участка плотины, образование прорана и волны	Малая ( $\approx 10^{-4}$ )	Опорожнение водохранилища, затопление территории в нижнем бьефе, значительный социальный, материальный и экологический ущерб (меньший,	Планировка и укрепление откосов и гребня плотины, пригрузка низового откоса на указанном участке

		конкретном участке	прорыва		чем в сценарии 1, т. к. перелив начинается при НПУ)	
--	--	-----------------------	---------	--	--	--

Достоинством методов «Что будет, если... ?» («What – if?») и проверочного листа («Check List») является их простота для понимания всеми участниками анализа риска и относительно небольшие временные затраты на реализацию. К недостаткам следует отнести необходимость рассмотрения весьма широкого перечня событий и процессов, а также всегда присутствующую возможность упущения ряда действительно серьезных опасностей, способных привести к крупной аварии на опасном объекте.

Указанные методы весьма эффективны практически на всех стадиях жизненного цикла опасных объектов для предварительного анализа опасностей и качественного анализа риска аварий.

Качественные оценки вероятностей аварий по каждому из выявленных возможных сценариев их возникновения и развития рекомендуется выполнять на основе коллективного мнения экспертов, сформулированного с помощью формализма нечетких множеств, количественные оценки – как экспертным, так и расчетным путем.

#### **4.2. Анализ опасности и работоспособности («Hazard and Operability Study» – HAZOP)**

Применение метода HAZOP начинается, в отличие от методов «Что будет, если...?» («What – if?») и проверочного листа («Check List»), не с определения видов возможных повреждений и неполадок, а с изучения всего перечня контролируемых показателей состояния анализируемого объекта и их отклонений от допустимых значений (критериев безопасности).

Метод HAZOP основан на предположении (подтверждаемом обширным опытом эксплуатации опасных объектов), согласно которому развивающиеся или уже имеющиеся повреждения и неполадки проявляются в той или иной мере в отклонениях значений показателей состояния объекта от обычно наблюдаемого или предельно допустимого уровня.

Применение данного метода начинается с исследования компоновки

и структуры элементов анализируемого объекта, воздействий и нагрузок на него, а также особенностей жизненного цикла объекта, включая уже имевшие место повреждения, аварии и неполадки. Далее изучается весь перечень контролируемых показателей состояния объекта и анализируются все возможные отклонения каждого из показателей состояния от допустимых значений. Затем выявляются возможные причины и следствия этих отклонений. Наконец, на завершающем шаге определяются меры по предотвращению опасных отклонений показателей состояния объекта от допустимых значений. Результаты исследований для каждого из показателей состояния анализируемого сооружения заносятся в специальные таблицы.

Таким образом, реализация метода HAZOP заключается в получении ответов на вопросы: что может произойти с объектом при изменениях его показателей состояния, чем эти изменения могут быть вызваны, к чему приведут и как противодействовать нежелательным процессам и событиям.

В процессе изучения возможных отклонений показателей состояния объекта от допустимых значений рекомендуется использовать ключевые слова «нет», «больше», «меньше», «другой», «иначе чем» и т. д. Примерное содержание ключевых слов следующее:

«нет» – отсутствие возможности поступления компонента; отсутствие персонала на объекте в момент повреждения; отсутствие электропитания приводов необходимого оборудования и т. д.;

«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.

Приведенный перечень носит предварительный характер и определяется для каждого объекта самостоятельно.

Степень опасности отклонений показателей состояния анализируемого объекта от предельно допустимых значений (критериев безопасности) в рамках метода HAZOP может быть определена как качественно (экспертные оценки), так и количественно – путем

расчетных оценок показателей прочности, устойчивости объекта, вероятностей (среднегодовых частот) реализации причин неполадок и повреждений, габаритов зоны аварийного воздействия и масштабов последствий возможных опасных отклонений. Пример применения метода анализа опасности и работоспособности для гидротехнического сооружения (ГТС) приведен в табл. 3.

Существенной особенностью метода FMEA является необходимость рассмотрения всех без исключения элементов и конструкций анализируемого объекта. Цель рассмотрения – определение по возможности всех мыслимых (не противоречащих законам природы и здравому смыслу) причин и видов отказов, повреждений и неполадок каждого из элементов (конструкций) объекта и последствий этих отказов, повреждений и неполадок для опасного объекта в целом и окружающей его среды, включая все основные группы реципиентов риска.

Таблица 3

**Примерный вид таблицы результатов применения метода анализа опасности и работоспособности (HAZOP)**

№ п/п	Показатель состояния ГТС	Предельно допустимое значение (критерий безопасности), м	Ключевое слово HAZOP	Причины изменения показателя состояния (в соответствии с ключевым словом)	Последствия изменения показателя состояния	Мероприятия по предотвращению опасных отклонений показателя состояния от ПДЗ
Правобережная грунтовая плотина						
1.1.	Отметка гребня	Проектная отметка – 150,00	«меньше»	Несанкционированные работы на плотине Ветровая и дождевая эрозия гребня Нарушение целостности крепления гребня и откосов плотины	В сверхрасчетный паводок – перелив через гребень плотины на участке понижения, образование прорана и волны прорыва, затопление территории в нижнем бьефе	Контроль состояния крепления гребня и откосов плотины, запрет на несанкционированные работы на плотине, восстановление крепления гребня и откосов плотины
			«больше»	Несанкционированные работы на плотине	Опасности не представляет, далее не рассматривается	
1.2.	Положение поверхности депрессии в створе 1	Максимальные уровни воды в пьезометрах: пьезометр 1 – 124,5; пьезометр 2 – 133,2; пьезометр 3 – 136,8	«меньше»	Консолидация грунтов тела плотины	Опасности не представляет, далее не рассматривается	
			«больше»	Старение грунтов, суффозия, подтопление низового откоса при сверхрасчетных атмосферных осадках или засорении дренажной канавы	Потеря фильтрационной прочности грунтов тела плотины, обрушение участка плотины,	Расчистка дренажной канавы, планировка и укрепление гребня и откосов плотины

В этом аспекте метод FMEA дает возможность провести более полный качественный анализ причин и последствий отказов элементов и конструкций объекта, чем метод анализа «дерева отказов», в котором анализируются и оцениваются только те события, отказы и процессы, которые приводят к головному событию.

Как правило, метод FMEA применяется для качественного анализа риска аварий на опасном объекте. Однако его использование зачастую связано со значительными трудозатратами, поскольку необходимо рассмотреть максимально широкий перечень возможных причин и видов отказов, в том числе и не опасных для третьих лиц. Тем не менее, метод FMEA весьма полезен на стадии предварительного анализа опасностей. Кроме того, данный метод позволяет составить максимально подробный перечень показателей состояния объекта и необходимых проверок соответствия этих показателей предельно допустимым значениям (критериям безопасности).

### **4.3. Анализ вида, последствий и критичности отказа («Failure Mode, Effects and Critical Analysis» – FMECA)**

Анализ вида и последствий отказа (FMEA) можно расширить до количественного анализа вида, последствий и критичности отказа (FMECA) путем ранжирования всех идентифицированных видов отказов элементов и конструкций анализируемого объекта с учетом двух составляющих критичности – вероятности (среднегодовой частоты) и тяжести последствий данного отказа.

Понятие критичности достаточно близко к понятию риска и может использоваться при детальном количественном анализе риска аварий опасных объектов. Определение параметров критичности весьма полезно при обосновании приоритетов и выборе мероприятий по повышению безопасности объектов, причем для разных целей анализа риска возможны разные пути установления параметров критичности.

При проведении анализа риска аварий опасных объектов в соответствии с требованиями правовых и нормативных актов Российской Федерации необходимо выделять четыре группы реципиентов риска, которым может быть нанесен ущерб от аварии на опасном объекте – персонал объекта, население, материальные объекты (имущество третьих лиц) и окружающая природная среда. По

отношению к указанным группам реципиентов риска при выполнении анализа риска аварий на опасных объектах в рамках разработки деклараций безопасности, расчетов вероятного вреда от аварии, определении критериев безопасности объекта целесообразно использовать следующие параметры критичности отказов по тяжести последствий:

**катастрофический отказ** – приводит к гибели и травмам людей, наносит значительный ущерб анализируемому объекту, населению, имуществу третьих лиц и окружающей природной среде;

**критический отказ** – угрожает жизни и здоровью людей, наносит существенный ущерб анализируемому объекту, населению, имуществу третьих лиц и окружающей природной среде;

**некритический отказ** – не угрожает жизни и здоровью людей, потере объекта, имуществу третьих лиц и окружающей природной среде;

**отказ с пренебрежимо малыми последствиями** – не относится по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий.

В табл. 4 приведена матрица рекомендуемых параметров критичности по степени риска отказа, повреждения, неполадки, аварии с учетом тяжести последствий.

Таблица 4

Матрица «вероятность – тяжесть последствий»  
для анализа вида, последствий и критичности отказов (FMECA)

Ожидаемая частота возникновения отказа, 1/год		Тяжесть последствий			
		катастрофический отказ	критический отказ	некритический отказ	отказ с пренебрежимо малыми последствиями
Частый отказ	1	A	A	A	C
Вероятный отказ	$1-10^{-2}$	A	A	B	C
Возможный отказ	$10^{-2}-10^{-4}$	A	B	B	C
Редкий отказ	$10^{-4}-10^{-6}$	A	B	C	D
Практически невероятный отказ	$<10^{-6}$	B	C	C	D

Категории отказов, получаемые их ранжированием с помощью матрицы «вероятность – тяжесть последствий», выглядят следующим образом:

A – обязателен детальный количественный анализ риска, требуются особые меры снижения риска аварии и обеспечения безопасности ГТС;

B – желателен детальный количественный анализ риска, требуется принятие определенных мер безопасности;

C – рекомендуется проведение качественного анализа риска и

принятие определенных мер безопасности;

D – детальный анализ риска и принятие мер безопасности не требуются.

#### 4.4. Методы количественного анализа риска

Эти методы, как правило, характеризуются расчетом нескольких показателей риска, 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.

#### 4.5. Выбор методов анализа риска

Рекомендации по выбору методов анализа риска для различных видов деятельности и этапов функционирования опасного производственного объекта представлены в табл. 5.

Таблица 5

Рекомендации по выбору методов анализа риска

Метод	Вид деятельности				
	Размещение (предпроектные работы)	Проектирование	Ввод или вывод из эксплуатации	Эксплуатация	Реконструкция
Анализ «Что будет, если...?»	0	+	++	++	+
Метод проверочного листа	0	+	+	++	+

Метод	Вид деятельности				
	Размещение (предпроектные работы)	Проектирование	Ввод или вывод из эксплуатации	Эксплуатация	Реконструкция
Анализ опасности и работоспособности	0	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отказов	0	++	+	+	++
Анализ «деревьев отказов и событий»	0	++	+	+	++
Количественный анализ риска	++	++	0	+	++

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите, виды аварий на опасных производственных объектах.
2. Какие данные необходимо учитывать при выборе методов анализа риска?
3. Какие методы анализа риска используют на стадии идентификации опасностей?
4. Назовите основные количественные показатели риска.
5. Назовите особенности метода анализа риска «Что будет, если...?» («What – if?»).
6. Назовите особенности метода анализа риска проверочного листа («Check List»).
7. Назовите особенности метода анализа риска: анализ опасности и работоспособности («Hazard and Operability Study» – HAZOP).
8. Назовите особенности метода анализа риска: анализ вида и последствий отказов («Failure Mode and Effects Analysis» – FMEA).
9. Назовите особенности метода: анализ вида, последствий и критичности отказа («Failure Mode, Effects and Critical Analysis» – FMESA).
10. Особенности методов количественного анализа риска.

## Практическая работа №3

### ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** освоить методы применения статистических методов обработки информации о надежности технических систем.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.** В процессе выполнения работы студенты должны:

- ознакомиться с понятием «надежность»;
- ознакомиться с основными параметрами, характеризующими надежность технических систем;
- изучить основные критерии состояния технических систем;
- ознакомиться с порядком проведения анализа риска;
- решить задачи 5-7 по варианту, предложенному преподавателем и ответить на два контрольных вопроса.

*Надежность* – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

Понятие «надежность» часто относится к системам типа «человек-машина», к информационно-управляющим комплексам и пр. Надежность – сложное свойство, включающее следующие понятия.

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

*Долговечность* – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. (Между этими показателями имеются различия во временных показателях. Первое – работа без подналадок и ремонта, во втором случае суммарное время состоит из нескольких наработок до отказа). Для невосстанавливаемых объектов понятия безотказности и долговечности совпадают.

*Ремонтопригодность* – свойство объекта быть приспособленным к предупреждению и обнаружению предотказных состояний, отказов и повреждений, выполнению ремонтов и технического обслуживания. Повышению ремонтнопригодности способствует модульный принцип

устройства изделия, позволяющий целиком менять вышедшие из строя модули.

*Сохраняемость* – свойство объекта непрерывно сохранять значения установленных показателей его качества в заданных пределах в течение и после хранения и транспортировки. Для некоторых изделий надежность может включать только часть составных свойств. Так, для неремонтируемых изделий свойство надежности не включает долговечность и ремонтпригодность, а важнейшими свойствами являются безотказность и сохраняемость.

*Живучесть* – способность технического устройства противостоять крупным возмущениям, исключая процесс развития аварий и поломку оборудования.

В комплекс требований надежности технических систем входит и *безопасность* – это свойство технической системы, исключающее возникновение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

В теории надежности используют понятия объект, элемент система. *Объект* – это предмет определенного целевого назначения, рассматривающийся в периоды проектирования, производства, эксплуатации, изучения, исследования и испытаний на надежность. Объектами могут быть различные системы и их элементы (сооружения, установки, технические изделия, машины, отдельные детали и др.).

*Система* – это совокупность взаимосвязанных элементов, взаимодействующих в процессе работы. Признаком системы является структурированность, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели.

*Элемент* – это объект, представляющий собой простейшую часть системы. Само понятие элемента условно и относительно, т. к. любой элемент можно рассматривать как совокупность других элементов. Элементы системы могут быть как чисто механическими, электрическими, пневматическими, химическими, биологическими и пр., так и смешенными. Существуют системы, в которых влияние элементов друг на друга оказывается односторонним (элементы располагаются последовательно друг за другом и каждый предыдущий влияет на состояние или режим работы последующего). Система называется замкнутой, если изменение режима работы последнего ее элемента оказывает влияние на режим первого элемента. В такой системе все элементы последовательно односторонне между собой связаны. Система называется разомкнутой, если последний и первый ее элементы не охвачены обратной связью. Свойства замкнутых систем используются при создании систем автоматического регулирования. Если имеется

величина, которую требуется поддерживать постоянной (концентрация, температура, давление, влажность и пр.), то первый элемент системы автоматического регулирования (датчик) выбирается таким образом, чтобы его режим зависел от этой величины.

## Критерии состояния

Важным в теории надежности является понятие *техническое состояние*, определяющееся совокупностью подверженных изменению в производстве, эксплуатации и хранении свойств, которые характеризуются установленными признаками – критериями состояния. Для характеристики состояния объекта существуют следующие понятия:

*исправность* – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической и конструкторской документацией (НТД);

*неисправность* – состояние объекта, когда он не соответствует хотя бы одному требованию, установленному НТД;

*работоспособность* – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных НТД. Нормативно-технической документацией могут быть предусмотрены: уровень внешних воздействий, методы технического обслуживания и ремонта, нормы и допустимые отклонения от установленных параметров;

*неработоспособным* называют состояние, при котором один или несколько параметров выходят за пределы, установленные НТД, а система не способна выполнять свои функции.

Отличие между исправным и работоспособным состоянием состоит в том, что работоспособная система удовлетворяет требованиям обеспечения основных функций, в то время как другие требования (функции), например, внешний вид и др., не удовлетворяют. Система может быть неисправной, но работоспособной.

*Предельным* называют состояние, при котором дальнейшее применение системы по назначению недопустимо или нецелесообразно из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого отклонения заданных параметров за установленные пределы, недопустимого увеличения эксплуатационных расходов или необходимости проведения капитального ремонта. После предельного состояния может быть проведен капитальный ремонт для восстановления исправного состояния или систему прекращают использовать по прямому назначению. Невосстанавливаемый объект

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

Переход системы из одного состояния в другое происходит под воздействие события, которые разделяют на:

- *повреждение* – это нарушение исправности системы при сохранении работоспособного состояния;

- *отказ* – это нарушение работоспособного состояния системы.

Из этого видно, что неработоспособное состояние характеризуется отказными признаками, т. е. прекращением функционирования, в то время, как исправное состояние отказных признаков может не иметь. Перевод системы из неработоспособного состояния в работоспособное или из неисправного в исправное, называют *восстановлением*.

### **Опытное определение проявлений опасности**

Интенсивность и тяжесть опасных проявлений производственных объектов в большинстве случаев определяется в опытном порядке. Опытное определение проявлений ненадежности (опасности) объектов выполняется по предварительно разработанным планам наблюдений на основе накоплений статистики этих явлений. Для большинства видов проявлений ненадежности или опасности достаточной статистикой является 50-60 случаев обнаружения отказов (опасных явлений). По каждому наблюдению отмечается продолжительность наблюдения, число случаев каждого вида отказа и параметры, характеризующие тяжесть этих проявлений. Затем, используя результаты наблюдений по каждому производственному объекту, отличающемуся условиями его подбора и подбора окружающей его среды, определяются средние значения интенсивности и тяжести отдельных видов отказов (опасных явлений)

### **Примеры решения задач**

#### **Задача 1.**

На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За 3000 ч отказало 80 ламп, требуется определить вероятность безотказной работы  $P(t)$  и вероятность отказа  $Q(t)$  в течение 3000 ч

Дано:

$$N = 1000 \text{ шт.}$$

$$\Delta t = 3000 \text{ ч}$$

$$n = 80 \text{ шт.}$$

Найти:

$$P(t)$$

$$Q(t)$$

Решение:

Вероятность безотказной работы можно определить по формуле:

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N};$$

$$P(t) = \frac{1000 - 80}{1000} = 0,92;$$

Вероятность отказа рассчитывается по выражению:

$$Q(3000) = 1 - P(3000) = 0,08 \text{ или } Q(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{80}{1000} = 0,08.$$

### Задача 2.

На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За первые 3000 ч отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000–4000 ч отказало еще 50 ламп. Требуется определить частоту  $f(\Delta t)$  и интенсивность  $\lambda(\Delta t)$  отказов электронных ламп в промежутке времени  $\Delta t = 3000\text{--}4000$  ч.

Дано:

$$N = 1000 \text{ шт.}$$

$$\Delta t_1 = 3000 \text{ ч}$$

$$n_1 = 80 \text{ шт.}$$

$$\Delta t_2 = [3000, 4000]$$

$$n_2 = 50 \text{ шт.}$$

Найти:

$$a(\Delta t_2) \lambda(\Delta t_2)$$

Решение:

Частоту отказов можно определить по формуле

$$f(\Delta t_2) = \frac{n(\Delta t_2)}{N \cdot \Delta t_2};$$

$$f(\Delta t_2) = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1};$$

Интенсивность отказов за определенный промежуток времени можно определить по формуле

$$\lambda(\Delta t_2) = \frac{n(\Delta t_2)}{N_{CP} \cdot \Delta t_2},$$

где  $N_{CP} = \frac{N_{РАБ\ 1} + N_{РАБ\ 2}}{2};$

$$N_{РАБ\ 1} = 1000 - 80 = 920 \text{ шт.};$$

$$N_{РАБ\ 2} = 1000 - 130 = 870 \text{ шт.};$$

$$N_{CP} = \frac{(1000 - 80) + (920 - 50)}{2} = 895 \text{ шт.};$$

$$\lambda(\Delta t_2) = \frac{50}{895 \cdot 1000} = 5,58 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

### Задача 3.

На испытание поставлено  $N_0 = 400$  изделий. За время  $t = 3000$  ч отказало  $n(t) = 200$  изделий, за интервал  $\Delta t = 100$  ч отказало  $n(\Delta t) = 100$  изделий. Требуется определить вероятность безотказной работы за 3000 ч, вероятность безотказной работы за 3100 ч, вероятность безотказной работы за 3050 ч, частоту отказов  $f(3050)$ , интенсивность отказов  $\lambda(3050)$ .

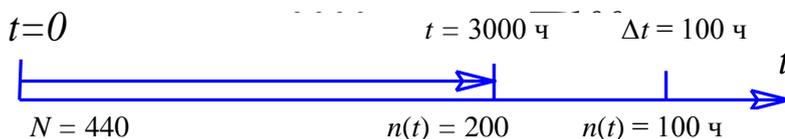


Рис. 1. Временной график

Дано:

$N = 400$  шт.

$t = 3000$  ч

$n = 200$  шт.

$\Delta t = 100$  ч

$n(\Delta t) = 100$  шт.

Найти:

$P(3000)$

$P(3100)$

$P(3050)$

$f(3050)$

$f(3000)$

$f(3100)$

$\lambda(3000)$

$\lambda(3050)$

$\lambda(3100)$

Решение:

Вероятность безотказной работы определяется по формуле

$$P(t) = \frac{N - n(\Delta t)}{N}.$$

Для  $t = 3000$  ч (начало интервала)

$$P(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0,5.$$

Для  $t = 3100$  ч (конец интервала)

$$P(3100) = \frac{N_0 - n(3100)}{N_0} = \frac{400 - 300}{400} = 0,25.$$

Среднее время исправно работающих изделий в интервале  $\Delta t$ :

$$N_{cp} = \frac{N_t + N_{t+1}}{2} = \frac{200 + 100}{2} = 150.$$

Число изделий, отказавших за время  $t = 3050$  ч:

$$n(3050) = N_0 - N_{cp} = 400 - 150 = 250,$$

тогда  $P(3050) = \frac{400 - 250}{400} = 0,375.$

Определяется частота отказа:

$$f(3050) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}; \quad f(3050) = \frac{100}{400 \cdot 100} = 0,0025 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

Так же определяется частота отказов за интервалы 3000 и 3100 ч, причем началом интервалов является  $t = 0$ .

$$f(3000) = \frac{200}{400 \cdot 3000} = 0,000167 = 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1};$$

$$f(3100) = \frac{300}{400 \cdot 3100} = 0,00024 = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

Определяется интенсивность отказов:

а) в интервале  $\Delta t = 3050$  ч,  $\lambda(3050) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \cdot \Delta t};$

$$\lambda(3050) = \frac{100}{150 \cdot 100} = 0,0067 = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

б) в интервале  $\Delta t = 3000$  ч,  $N_{cp}(3000) = 400 - 100 = 300$  шт.;

$$\lambda(3000) = \frac{100}{300 \cdot 3000} = 0,000222 = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1};$$

в) в интервале  $\Delta t = 3100$  ч,  $N_{cp}(3100) = 400 - 150 = 250$  шт.;

$$\lambda(3100) = \frac{100}{250 \cdot 3000} = 0,00039 = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

#### Задача 4.

В течение некоторого периода времени производилось наблюдение за работой одного объекта. За весь период зарегистрировано  $n = 15$  отказов. До начала наблюдений объект проработал 258 ч, к концу наблюдения наработка составила 1233 ч. Определить среднюю наработку на отказ  $t_{cp}$ .

Дано:

$$n = 15$$

$$t_1 = 258 \text{ ч}$$

$$t_2 = 1233 \text{ ч}$$

Решение:

Наработка за указанный период составила

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 1233 - 258 = 975 \text{ ч.}$$

Наработка на отказ по статистическим данным

Найти:

$t_{cp}$

определяется по формуле

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

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

Приняв  $\sum_{i=1}^n t_i = 975$  ч, можно определить среднюю наработку на отказ

$$t_{cp} = \frac{975}{15} = 65 \text{ ч.}$$

### Контрольные задания

#### Задача 5.

На испытание поставлено  $N$  однотипных электронных ламп. За  $t_1$  ч отказало  $n_1$  ламп. Требуется определить вероятность безотказной работы  $P(t)$  и вероятность отказа  $Q(t)$  в течение  $t_1$  ч. Исходные данные в зависимости от варианта приведены в табл. 6.

Таблица 6

Исходные данные для задачи 5

№ вар.	$N$	$t_1$	$n$
1	1500	2100	110
2	1600	2200	120
3	1700	2300	130
4	1800	2400	140
5	1900	2500	150
6	1400	2600	130
7	1300	2700	160
8	1200	2800	140
9	1100	2900	130

№ вар	$N$	$t_1$	$n$
10	2000	3400	250
11	2100	3300	240
12	2200	3500	230
13	2300	3300	220
14	2400	3500	210
15	2500	3600	260
16	2600	3700	270
17	2700	3800	280
18	2800	3900	290

№ вар.	$N$	$t_1$	$n$
19	2000	2100	70
20	2100	2200	75
21	2200	2300	80
22	2300	2400	85
23	2400	2500	90
24	2500	2600	110
25	2600	2700	120
26	2700	2800	130
27	2800	2900	150

### Задача 6.

На испытание поставлено  $N$  однотипных изделий. За первые  $t_1$  ч отказало  $n_1$  изделий, а за следующий интервал времени  $t_2$  ч отказало еще  $n_2$  изделий. Требуется определить частоту  $f(\Delta t)$  и интенсивность  $\lambda(\Delta t)$  отказов изделий в промежутке времени  $t_1$  ч. Исходные данные приведены в табл. 7.

Таблица 7

Исходные данные для задачи 6

№ вар	$N$	$t_1$	$t_2$	$n_1$	$n_2$
1	2000	4100	150	110	30
2	2100	4150	160	120	35
3	2200	4200	170	130	40
4	2300	4250	180	140	45
5	2400	4300	190	150	50
6	2500	4350	200	160	55
7	2600	4400	210	170	60
8	2700	4450	220	150	65
9	2800	4500	230	140	70
10	2850	4550	240	170	75
11	2750	4600	250	180	80
12	2650	4650	260	190	85
13	2550	4700	270	160	70
14	1500	3100	180	85	40
15	1600	3150	190	90	35
16	1700	3200	200	95	45
17	1800	3250	210	100	50
18	1900	3300	220	110	55
19	1400	3350	230	115	60
20	1300	3400	250	120	50
21	1200	3450	240	125	45
22	1100	3500	230	130	40

№ вар	$N$	$t_1$	$t_2$	$n_1$	$n_2$
23	2000	3550	220	140	55
24	2100	3600	210	150	60
25	2200	3700	200	160	65
26	2300	3800	190	170	50

### Задача 7.

На испытание поставлено  $N$  изделий. За время  $t_1$  ч отказало  $n_1$  изделий, за следующий интервал  $t_2$  ч отказало  $n_2$  изделий. Требуется определить вероятность безотказной работы за  $t_1$  ч, вероятность безотказной работы за  $(t_1 + t_2)$  ч, вероятность безотказной работы от начала испытаний до среднего значения времени интервала  $t_2$  ( $t_{2cp}$ ) ч, частоту отказов  $ft_{2cp}$ , интенсивность отказов  $\lambda t_{2cp}$ . Исходные данные для вариантов приведены в табл. 8.

Таблица 8

### Исходные данные для задачи 7

№ вар.	$N$	$t_1$	$n_1$	$t_2$	$n_2$
1	450	4150	120	210	90
2	500	4100	110	220	80
3	550	4250	130	230	70
4	600	4200	160	220	60
5	650	4300	140	230	80
6	700	4150	150	240	70
7	650	4050	170	250	90
8	600	4100	160	240	100
9	550	4150	140	250	90
10	500	4200	160	260	80
11	450	4250	130	210	70
12	430	4300	150	220	90
13	420	4350	140	230	110
14	440	135	150	250	120
15	445	130	140	240	110
16	450	140	160	260	100
17	455	145	150	250	90
18	460	150	170	270	80
19	465	155	160	240	70
20	470	145	180	280	90
21	475	150	170	260	100
22	480	155	190	290	110

№ вар.	$N$	$t_1$	$n_1$	$t_2$	$n_2$
23	485	140	160	270	120
24	490	145	180	280	100
25	480	155	170	270	90
26	475	140	160	260	80

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение «надежность».
2. Что понимают под «безотказностью» технических систем?
3. Что такое долговечность технических систем?
4. Что такое ремонтпригодность технической системы?
5. Что понимают под сохраняемостью технических систем?
6. Как рассчитать частоту отказов?
7. Как определить интенсивность отказов?
8. Что такое система, объект, элемент?
9. Назовите основные критерии состояния технических систем.
10. Что такое исправное состояние технической системы?
11. Что такое работоспособное состояние технической системы?
12. Что такое повреждение технической системы?
13. Что такое отказ технической системы?

## Практическая работа 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ НЕГАТИВНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ПРИ РАБОТЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** освоить методы определения интенсивности негативных проявлений при работе технических систем.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.** В процессе выполнения работы студенты должны:

- ознакомиться с видами негативных проявлений при работе технических систем;
- ознакомиться с основными методами определения интенсивности негативных проявлений при работе технических систем;
- ответить на два контрольных вопроса.

## Введение

Теория надежности (ТН) – это научная дисциплина, изучающая общие методы и приемы проектирования, изготовления, эксплуатации изделий (технических систем) для обеспечения максимальной их эффективности в процессе использования, а также разрабатывающая общие методы расчета качества систем по известным качествам составляющих их частей. ТН устанавливает закономерности возникновения отказов устройств (систем) и методы их прогнозирования, ищет способы повышения их надежности на всех этапах их жизненного цикла (проектирования, создания, использования).

Надежность и техногенный риск взаимосвязаны: повышение надежности уменьшает техногенный риск, но требует дополнительных материальных затрат; при низкой надежности стоимость технических систем, как правило, меньше, но требуется больше затрат на ремонт, ликвидацию последствий аварий. Абсолютно надежных систем нет, поэтому инженер должен грамотно оценивать техногенный риск, заложенный в проект, средства и мероприятия, предназначенные для минимизации ущерба в случае аварии, применять методы их прогнозирования и предупреждения.

Задачей теории надежности является изучение:

- закономерностей возникновения отказов систем;
- нормированных критериев и количественных характеристик надежности;
- методов анализа сложных систем по критериям надежности;
- методов повышения надежности;
- методов испытаний на надежность;
- методов эксплуатации систем с учетом надежности (обоснование периодичности технического обслуживания систем, нормы запасных частей, методов отыскания неисправностей).

### **Критерии надежности невосстанавливаемых изделий**

Пусть на испытании находится  $N_0$  объектов, и пусть испытания считаются законченными, если все они отказали. Вместо отказавших образцов отремонтированные или новые не ставятся. В таких случаях критериями надежности изделий являются:

- вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;
- частота отказов  $f(t)$ ;
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ;
- средняя наработка до отказа  $T_1$ .

*Вероятностью безотказной работы (ВБР)* называется *количественная мера* того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

*Функция  $P$*  – относительная продолжительность непрерывной исправной работы объекта до первого отказа, а *аргумент  $t$*  – время, за которое нужно определить ВБР, следовательно, согласно определению,

$$P(t) = P(T \geq t), \quad t \geq 0, \quad (1.1)$$

где  $T$  – время работы объекта от начала до первого отказа;  $t$  – время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы.

*Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах* оценивается выражением

$$\hat{P}(t) = (N_0 - n(t)) / N_0, \quad (1.2)$$

где  $\hat{P}(t)$  – статистическая оценка вероятности безотказной работы;  $N_0$  – число объектов в начале работы (серии испытаний);  $n(t)$  – число отказавших элементов за время  $t$ .

На практике, наряду с ВБР, определяют такую характеристику, как *вероятность отказа  $Q(t)$* .

*Вероятностью отказа* называется *количественная мера* того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникает хотя бы один отказ.

Отказ и безотказная работа являются событиями несовместными и противоположными, поэтому при  $0 \leq t$

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

где  $Q(t) = F(t)$  – интегральная функция распределения случайной величины.

Статистически вероятность отказа равна:

$$\hat{Q}(t) = n(t) / N_0, \quad (1.4)$$

$$\hat{Q}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0},$$

где  $n_i$  – число неблагоприятных исходов;  $N_0$  – общее число испытаний.

Если функция  $Q(t)$  дифференцируема, то производная от интегральной функции распределения – дифференциальный закон (*плотность вероятности, плотность распределения*) случайной величины  $T$  – времени безотказной работы:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.5)$$

*Частотой отказов по статистическим данным* называется отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих (испытываемых) при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются. Согласно определению,

$$\hat{f}(t) = n(\Delta t)/N_0 \Delta t \quad \text{или} \quad a(t) = n(\Delta t)/N_0 \Delta t, \quad (1.6)$$

где  $n(\Delta t)$  – число отказавших элементов в интервале времени от  $(t - \Delta t)/2$  до  $(t + \Delta t)/2$ .

*Частота отказов* есть плотность вероятности (или закон распределения) времени работы изделия до первого отказа. Поэтому

$$f(t) = -\frac{dP}{dt} = -P'(t) = \frac{dQ(t)}{dt} Q'(t),$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (1.7)$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (1.8)$$

*Интенсивностью отказов по статистическим данным* называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

$$\hat{\lambda}(t) = n(\Delta t)/N_{cp} \cdot \Delta t, \quad (1.9)$$

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

*Интенсивность отказов в вероятностной оценке* есть условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что с рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Вероятностная оценка характеристики  $\lambda(t)$  находится из выражения

$$\lambda(t) = f(t) / P(t) \quad (1.10)$$

или  $f(t) = \lambda(t) P(t)$ .

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} . \quad (1.11)$$

*Средней наработкой до первого отказа* называется математическое ожидание времени работы объекта до отказа.

Математическое ожидание средней наработки до отказа  $T_1$  вычисляется через частоту отказов (плотность распределения времени безотказной работы):

$$m_t = T_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt . \quad (1.12)$$

Зная, что  $t > 0$  и  $P(0) = 1$ , а  $P(\infty) = 0$ , определяют  $T_1$ :

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt . \quad (1.13)$$

*Средняя наработка до первого отказа*, согласно статистическим данным об отказах, вычисляется по формуле

$$\hat{T}_1 = (\sum_{i=1}^m n_i t_i) / N_0 , \quad (1.14)$$

где  $t_i$  – время безотказной работы  $i$ -го образца;  $N_0$  – число испытываемых объектов.

Для определения *средней наработки до первого отказа* необходимо знать моменты выхода из строя всех испытываемых объектов. Поэтому для вычисления  $\hat{T}_1$  пользоваться данной формулой неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя элементов  $n_i$  в каждом  $i$ -м интервале времени, среднюю наработку до первого отказа лучше определять по уравнению

$$\hat{T}_1 \approx (\sum_{i=1}^m n_i t_{cpi}) / N_0 , \quad (1.15)$$

где  $t_{cp}$  и  $m$  находятся по следующим формулам:

$$t_{cp} = (t_{i-1} + t_i) / 2 , \quad m = t_k / \Delta t , \quad (1.16)$$

где  $t_{i-1}$  – время начала  $i$ -го интервала;  $t_i$  – время конца  $i$ -го интервала;  $t_k$  – время, в течение которого вышли из строя все элементы;  $\Delta t = t_{i-1} - t_i$  – интервал времени.

При расчетах надежности технических устройств часто применяются законы распределения: экспоненциальный, усеченный нормальный, Рэлея, гамма, Вейбулла – Гнеденко, логарифмически-нормальный. В табл. 9 приведены выражения для расчета количественных характеристик объектов, соответствующих

перечисленным законам распределения времени их безотказной работы.

Таблица 9

Интенсивность отказов элементов

Закон распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	Средняя наработка до первого отказа
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = \text{const}$	$\frac{1}{\lambda}$
Рэля	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma$
Гамма (при $k$ целом)	$e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t}$	$\frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}$	$\frac{k}{\lambda_0}$
Вейбулла – Гнеденко	$\lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}$	$e^{-\lambda_0 t^k}$	$\lambda_0 k t^{k-1}$	$\frac{r(\frac{1}{k} + 1)}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}$
Усеченный нормальный	$\frac{1}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right) \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{F\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}$	$\frac{e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma F\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}}$	$T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}} e^{-\frac{T^2}{2\sigma^2}}$
Логарифмически-нормальный	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}$	$\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \frac{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}}{0,5 + \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)}$	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

Из приведенных соотношений видно, что все характеристики, кроме средней наработки до первого отказа, зависят от времени (являются функциями времени).

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценивать надежность невозстанавливаемых объектов, а также надежность восстанавливаемых объектов до первого отказа. Наличие нескольких критериев не означает, что всегда нужно оценивать надежность объектов по всем характеристикам.

Наиболее полной характеристикой надежности является частота отказов  $f(t)$  (плотность распределения), она содержит в себе все данные о

случайном явлении – времени безотказной работы.

Средняя наработка до первого отказа является достаточно наглядной характеристикой надежности. Однако применение этого критерия для оценки надежности сложной системы ограничено в тех случаях, когда:

- время работы системы гораздо меньше среднего времени безотказной работы;
- закон распределения времени безотказной работы не однопараметрический и для достижения полной оценки требуются моменты высших порядков;
- система резервированная;
- интенсивность отказов не постоянная;
- время работы отдельных частей сложной системы разное.

*Интенсивность отказа* – наиболее удобная характеристика надежности простейших элементов, так как позволяет просто вычислять количественные характеристики надежности сложных систем.

*Наиболее целесообразно* оценивать надежность сложных систем по критерию *вероятности безотказной работы*, так как:

- она входит в качестве сомножителя в другие, более общие характеристики систем, например в эффективность и стоимость (цена и стоимость различаются);
- характеризует надежность с учетом изменения во времени;
- может быть получена сравнительно простыми расчетами в процессе проектирования систем и оценена в процессе испытаний.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дайте определение «теории надежности».
2. Назовите задачи «теории надежности».
3. Назовите критерии надежности технических систем.
4. Как определить вероятность безотказной работы технической системы?
5. Дайте определение частоты отказов технических систем.
6. Как рассчитать частоту отказов?
7. Как определить интенсивность отказов?
8. Дайте понятие средней наработкой до первого отказа.
9. Как рассчитать среднюю наработку до первого отказа?

## Практическая работа 5

### АНАЛИЗ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА ПОСТРОЕНИЕМ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ И ДЕРЕВА СОБЫТИЙ.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** освоить методы анализа техногенного риска построением деревьев отказов и деревьев событий.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.** В процессе выполнения работы студенты должны:

- ознакомиться с основными понятиями теории надежности;
- изучить виды отказов технических систем;
- ознакомиться с понятием риска, методами его расчета на основании статистических данных;
- решить задачи 1-3 и ответить на два контрольных вопроса.

#### 1. Основные понятия теории надежности

**Надежность** – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технологического обслуживания, хранения и транспортирования.

Под объектом подразумевается изделия, сооружения и системы, а также подсистемы, компоненты и элементы.

К параметрам, характеризующим способность выполнять требуемые функции, относят геометрические, кинематические и динамические параметры, показатели конструкционной прочности, показатели точности функционирования, производительности, скорости и т. п. С течением времени значения этих параметров могут изменяться, характеризуя то или иное состояние объекта.

Основными понятиями в теории надежности являются объект, элемент, система. **Объект** – это предмет определенного целевого назначения, рассматривающийся в периоды проектирования, производства, эксплуатации, изучения, исследования и испытаний на надежность. **Система** – это совокупность взаимосвязанных элементов, взаимодействующих в процессе работы. **Элемент** – это объект, представляющий простейшую часть системы.

Системы могут быть как чисто механическими, электрическими, пневматическими, биологическими и пр., так и смешанными.

Производственные системы могут отличаться тем, что в качестве составных элементов в них могут входить люди. С одной стороны присутствие людей в производственных системах усиливает такие важные свойства, как адаптивность и самоорганизация, а с другой стороны люди сами являются серьезным источником ненадежности и опасности.

Для характеристики состояния объекта существуют понятия исправность, неисправность, работоспособность, неработоспособность. **Исправность** – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией. **Неисправность** – это состояние объекта, когда он не соответствует хотя бы одному требованию, установленному нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.

**Работоспособность** – это состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией. **Неработоспособным** называют состояние, при котором один или несколько параметров выходят за пределы, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией, а система не способна выполнять свои функции.

Нормативно-технической документацией могут быть предусмотрены: уровень внешних воздействий, методы технического обслуживания и ремонта, нормы и допустимые отклонения от установленных параметров и т. п. Отличие между исправным и работоспособным состоянием состоит в том, что работоспособный объект удовлетворяет лишь тем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. В то же время другие требования (функции), например, внешний вид и пр., не удовлетворяют этим требованиям. Объект может быть неисправным, но работоспособным.

**Предельным** называют состояние, при котором дальнейшее применение объекта по назначению недопустимо или нецелесообразно из-за требований безопасности или неустранимого снижения эффективности. После предельного состояния может быть проведен капитальный ремонт для восстановления исправного состояния или объект прекращают использовать по прямому назначению.

Переход объекта из одного состояния в другое происходит под

воздействием событий, которые разделяют на повреждение и отказ. **Повреждение** – это событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния. **Отказ** – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

**Критерий отказа** – это признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

**Причина отказа** – это явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.

**Последствия отказа** – это явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.

Различают **внезапный** и **постепенный** отказы. В отличие от внезапного отказа, наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Поэтому имеется возможность предупредить наступление отказа или принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий.

Среди внезапных отказов выделяют категорию **сбоев** – самоустраняющихся отказов или однократных отказов, устраняемых вмешательством операторов.

По причинам возникновения различают конструктивные, производственные и эксплуатационные отказы. **Конструктивными** называют отказы, возникающие по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

Если отказ возник по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии, его называют **производственным**. Отказы, связанные с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации, называют **эксплуатационными**.

## 2. Понятия и классификация рисков

Слово **риск** обозначает возможную опасность либо действие наугад в надежде на удачный исход. В настоящее время в большинстве случаев под риском понимается возможная опасность потерь, связанных со

спецификой тех или иных видов деятельности человеческого общества и явлений природы.

Опасность обычно рассматривается как объективно существующая возможность негативного воздействия на личность, общество, природную среду, в результате которого им может быть причинен какой-либо ущерб, вред, ухудшающий состояние, придающий их развитию нежелательные динамику или параметры.

Опасность техногенного характера рассматривается как состояние, внутренне присущее технической системе, промышленному или транспортному объекту, реализуемое в виде поражающих воздействий источника техногенной чрезвычайной ситуации на человека и окружающую среду при его возникновении либо в виде прямого или косвенного ущерба для человека и окружающей среды в процессе нормальной эксплуатации этих объектов.

В общем случае последствия чрезвычайных ситуаций и аварий можно разделить на три группы ущерба:

- причинение ущерба жизни и здоровью людей;
- экономические ущербы:
  - из-за повреждения сооружения или конструкции;
  - косвенные убытки из-за выхода их из эксплуатации и остановки производства;
- ущерб и неблагоприятные последствия для окружающей среды и культурных ценностей.

Величину индивидуального риска рассчитывают как отношение количества свершившихся событий с негативными последствиями к максимально возможному их количеству, на которое могут распространиться негативные последствия, за определенный временной период:

$$R = \frac{n}{N}, \quad (5.1)$$

где  $n$  – количество свершившихся событий с негативными последствиями;  $N$  – максимально возможное количество событий, на которое могут распространиться негативные последствия.

Из приведенной формулировки видно, что риск – это вероятность свершения негативного события и для его определения необходим значительный статистический материал

Для оценки тяжести последствий опасности вводится также понятие риска, определяемое как произведение вероятности свершения негативного события и величины ущерба, ожидаемого при реализации

этого события

$$R_N = RY, \quad (5.2)$$

где  $R$  – вероятность свершения негативного события;

$Y$  – величина ущерба, ожидаемого при реализации негативного события.

Если могут быть несколько ( $i$ ) неблагоприятных событий с различными вероятностями ( $R_i$ ), то риск ожидаемого ущерба определяется по формуле

$$R_N = \sum_i R_i Y_i, \quad (5.3)$$

где  $Y_i$  – величина ущерба, ожидаемого от негативного события, имеющего вероятность реализации  $R_i$ .

Приведенные выражения (5.2) и (5.3) показывают, что один и тот же риск может быть вызван или высокой вероятностью отказа с незначительными последствиями (отказ какой-либо системы автомобиля) или ограниченной вероятностью отказа с высоким уровнем ущерба (отказ системы на атомной электростанции).

При анализе опасностей для населения и окружающей среды используют риск, отнесенный к единице времени, которая чаще всего равна одному году.

По масштабам распространения различают риски, приходящиеся на отдельного человека, группу людей, население региона, нацию, все человечество.

В зависимости от основной причины возникновения существуют риски:

**природные риски** – риски, связанные с проявлениями стихийных сил природы: землетрясениями, наводнениями, бурями и т. п.;

**техногенные риски** – риски, связанные опасностями, исходящими от технических объектов;

**экологические риски** – риски, связанные с загрязнением окружающей среды;

**коммерческие риски** – риски, связанные с опасностью потерь в результате финансово-хозяйственной деятельности.

По степени допустимости риск бывает:

**пренебрежимый риск** – имеет настолько малый уровень, что он

находится в пределах допустимых отклонений естественного (фонового) уровня;

**приемлемый риск** – уровень, с которым мирятся, учитывая технико-экономические и социальные возможности общества на данном этапе развития;

**предельно допустимый риск** – уровень, который не должен превышать независимо от ожидаемой выгоды;

**чрезмерный риск** – в подавляющем большинстве случаев приводит к негативным последствиям.

В большинстве развитых стран статистические данные об индивидуальном риске гибели людей от воздействия негативных факторов в различных областях деятельности собираются и публикуются в печати. Так, риск гибели людей при подземной угледобыче (отношение числа погибших к общей численности работающих в этой отрасли) равен  $10^{-4}$ . В статистическом плане это означает, что из 10000 человек, занятых подземной угледобычей, погибает один человек в год. Риск гибели альпинистов значительно больше и составляет около  $2 \cdot 10^{-3}$ . Риск гибели пассажиров железнодорожного транспорта в США составляет  $4 \cdot 10^{-6}$ .

В настоящее время сложилось представление о величинах приемлемого и неприемлемого риска. В некоторых странах приемлемый риск закреплен законодательно (например, Нидерланды) и равен  $10^{-6}$  в год. В Российской Федерации, согласно некоторым нормативным данным, он колеблется от  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$ . Неприемлемый риск имеет вероятность реализации более  $10^{-3}$ .

### 3. Методы анализа техногенного риска

Помимо собственно отказов, надежность и безопасность технических систем определяется рядом других событий, которые не являются отказами в прямом значении этого понятия. Так, отключение внешнего энергоснабжения – отказ в энергетической системе. Но по отношению, например, к работе холодильной системы, это не отказ, а внешнее событие. К внешним событиям, инициирующим отказы, относятся многие природные явления, которые являются потенциальными источниками опасности: землетрясения, наводнения, ураганы и т. п. Своеобразное место занимают события, связанные с действиями человека, например, оператора.

В современной теории надежности все чаще используют понятие события, которое намного шире понятия отказа, являющегося частным случаем события. Поэтому в последнее время все шире применяют

логические схемы типа деревьев событий и деревьев отказов.

Методы деревьев отказов и событий позволяют учесть функциональные взаимосвязи элементов системы в виде логических схем, учитывающих взаимозависимость отказов элементов или групп элементов. В общем случае, как деревья событий, так и деревья отказов являются лишь наглядной иллюстрацией к простейшим вероятностным моделям. Однако они представляют значительный интерес у специалистов, особенно тех, кто связан с эксплуатацией, техническим обслуживанием и надзором технических объектов. Имея такую схему, специалист, даже не имеющий подготовки по теории вероятностей, может найти неблагоприятный, наиболее критический вариант развития событий. Он может даже оценить ожидаемый риск, если соответствующее дерево событий или отказов оснащено соответствующими статистическими данными.

### 3.1. Анализ техногенного риска построением деревьев отказов

Методика построения *дерева отказов* состоит из следующих этапов.

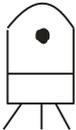
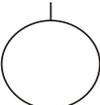
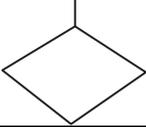
1. Определяют аварийное (предельно опасное, конечное) событие, которое образует вершину дерева. Данное событие четко формулируют, дают признаки его точного распознавания. К таким событиям можно отнести взрыв, пожар, выход процесса из-под контроля и др. Если конечное событие сразу определить не удастся, то производят прямой анализ работы объекта с учетом изменения состояния работоспособности, ошибок оператора и т. п. Перечисляют возможные отказы, рассматривают их комбинации, определяют последствия этих событий.

2. Используя стандартные символы событий и логические символы (табл. 10) дерево отказов строят в соответствии со следующими правилами:

- конечное (аварийное) событие помещают вверху;
- дерево состоит из последовательности событий, которые ведут к конечному событию;
- последовательности событий образуются с помощью логических символов **И**, **ИЛИ** и др.;
- событие над логическим символом помещают в прямоугольнике, а само событие описывают в этом прямоугольнике;
- первичные события (исходные причины) располагают снизу.

Таблица 10

Стандартные символы событий и логические символы,  
применяемые при построении деревьев отказов

Вид элемента	Наименование	Описание
	Схема <b>И</b> (совмещение)	Выходной сигнал <b>В</b> появляется только тогда, когда поступают все входные сигналы $A_i$
	Схема <b>ИЛИ</b> (объединение)	Выходной сигнал <b>В</b> появляется при поступлении любого одного или большего числа сигналов $A_i$
	Результирующее событие	Результат конкретной комбинации отказов на входе логической схемы
	Первичный отказ	
	Неполное событие	Отказ (неисправность), причины которого выявлены не полностью, например, из-за отсутствия информации

Простейшее дерево отказов, характеризующее возникновение пожара на объекте, показано на рис. 2.

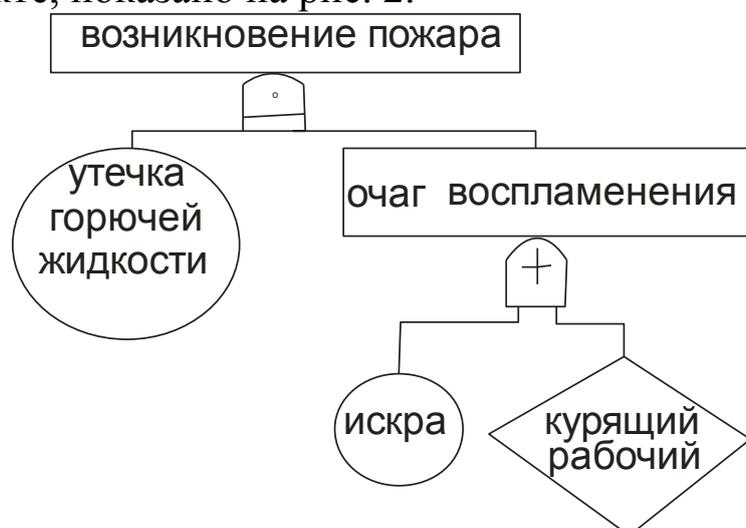


Рис. 2. Дерево отказов, описывающее возникновение пожара

При построении дерева события располагаются по уровням. Главное (конечное) событие занимает верхний – 0-й уровень, ниже располагаются события 1-го уровня (среди них могут быть и начальные), затем 2-го уровня и т. д. Если на 1-м уровне содержится одно или несколько начальных событий, объединенных логическим символом ИЛИ, то возможен непосредственный переход от начального события к аварии.

3. Определяют минимальные аварийные сочетания и минимальную траекторию для построения дерева. Первичные и неразлагаемые события соединены с событием 0-го уровня маршрутами (ветвями). Сложное дерево имеет различные наборы исходных событий, при которых достигается событие в вершине; они называются аварийными сочетаниями.

4. Квалифицированные эксперты проверяют правильность построения дерева, что позволяет исключить субъективные ошибки разработчика, повысить точность и полноту описания объекта и его действий.

5. Качественно и количественно исследуют дерево отказов с помощью выделенных минимальных аварийных сочетаний и траекторий. Качественный анализ заключается в сопоставлении различных маршрутов от начальных событий к конечному и определении критических (наиболее опасных) путей, приводящих к аварии.

При количественном исследовании рассчитывают вероятность появления аварии в течение заданного интервала времени по всем возможным маршрутам. При расчете вероятности возникновения аварии необходимо учитывать применяемые логические символы

Вероятность  $P(\mathbf{B})$  выходного события  $\mathbf{B}$ , происходящего только в случае реализации всех входных событий  $A_1, A_2, A_n$  (схема **И**) определяют по формуле

$$P(B) = \prod_{i=1}^n P(A_i), \quad (5.4)$$

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

Вероятность выходного события  $\mathbf{B}$ , появляющегося при реализации любого одного или большего числа входных событий  $A_1, A_2, A_n$  (схема **ИЛИ**), определяют по формуле

$$P(B) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)]. \quad (5.5)$$

### 3.2. Анализ техногенного риска построением деревьев событий

Набор обстоятельств (не только отказов системы, но и внешних воздействий на нее), ведущих к аварии, называется последовательностью аварии (или сценарием), которую можно проследить с помощью дерева событий. В отличие от деревьев отказов деревья событий имеют более полное физическое содержание.

Анализ дерева событий может дать ответ на вопросы: какие аварийные ситуации могут возникнуть, и какие вероятности этих событий? Ответы могут быть получены с помощью анализа потенциальных сценариев аварии. Последовательности потенциальных событий определяются, начиная с исходного события и последующего анализа прочих событий, вплоть до того момента, когда, либо происходит, либо предотвращается. Полную картину риска от промышленного объекта дает анализ всех возможных последствий.

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

Определив все исходные события и организовав их в логическую последовательность, можно получить большое число (иногда тысячи) потенциальных сценариев аварии. С помощью анализа дерева событий можно определить пути развития аварии, которые вносят наибольший вклад в риск из-за их высокой вероятности или потенциального ущерба. Анализ ветвей и путей развития аварии позволяет вносить изменения в конструкцию или эксплуатационные процедуры с учетом этих путей, обуславливающих наибольший вклад в суммарный риск. Методологии дерева событий дает возможность:

- описать сценарии аварий с различными последствиями от различных исходных событий;
- определить взаимосвязь отказов систем с последствиями аварии;
- сократить первоначальный набор потенциальных аварий и ограничить его лишь логически значимыми авариями;

- идентифицировать верхние события для анализа дерева отказов.

Пример дерева событий, приведенный на рис 3, соответствует гипотетической последовательности событий при аварии с потерей теплоносителя в водоохлаждаемом реакторе атомной электростанции (АЭС). Начальным событием служит разрыв трубопровода с вероятностью  $P_0$ . Следующие события могут развиваться следующим образом:

- 1 – пребывание системы электроснабжения в исправном состоянии с вероятностью  $S_1$ , или в неисправном состоянии с вероятностью  $P_1$ ;
- 2 – срабатывание системы аварийного охлаждения с вероятностью  $S_2$  или несрабатывание с вероятностью  $P_2$ ;
- 3 – срабатывание системы удаления продуктов радиоактивного деления с вероятностью  $S_3$  или несрабатывание с вероятностью  $P_3$ ;
- 4 – сохранение целостности защитной оболочки с вероятностью  $S_4$  или нарушение ее целостности с вероятностью  $P_4$ .

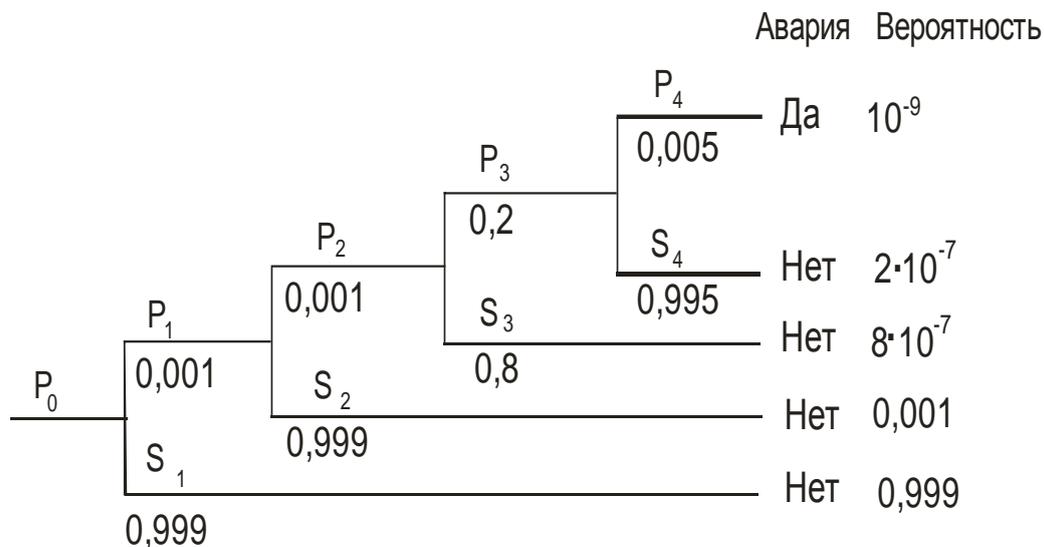


Рис. 3. Дерево событий при аварии на атомной электростанции

#### 4. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

**Задача 1.** Определить риск гибели человека и риск получения травмы на отдельных предприятиях. Исходные данные вариантов для расчета приведены в табл. 11.

Таблица 11

Исходные данные для решения задачи 1

Вариант	Численность работающих на предприятии	Число травм с летальным исходом в год	Число травмированных в год
1	500	1	3
2	700	2	5
3	800	2	9
4	900	2	15
5	1000	3	16
6	1100	2	7
7	1200	1	4
8	1300	0	5
9	1400	2	6
10	1500	3	17
11	1600	4	21
12	1700	3	8
13	1800	2	9
14	1900	1	10
15	2000	4	14
16	2100	3	13
17	2200	5	16
18	2300	2	21
19	2400	5	18
20	2500	7	26
21	2600	2	19
22	2700	0	17
23	2800	8	23
24	2900	1	27
25	3000	3	24

**Задача 2.** Построить дерево отказов заданного аварийного состояния. Исходные данные приведены в табл. 12.

Таблица 12

Исходные данные для выполнения задачи 2

Вариант	Аварийная ситуация
1	Экзогенный пожар в шахте, возникший на конвейерной ленте
2	Экзогенный пожар в шахте, возникший в горной выработке
3	Эндогенный пожар в шахте, возникший в выработанном пространстве
4	Взрыв метана в шахте, возникший в подготовительной выработке
5	Взрыв метана в шахте, возникший при ведении очистных работ

6	Эндогенный пожар, возникший на породном отвале разреза
7	Воспламенение метана при ведении взрывных работ в шахте
8	Взрыв угольной пыли в шахте при ведении очистных работ
9	Возникновение пожара на складе горючих жидкостей
10	Выброс аварийно химически опасного вещества (жидкого хлора) из железнодорожной цистерны
11	Катастрофа пассажирского поезда
12	Авиационная катастрофа
13	Кораблекрушение
14	Пожар на фабрике по обогащению угля
15	Разрушение (прорыв) гидротехнического сооружения (плотины)

**Задача 3.** Построить дерево отказов, начальным событием которого является обрушение горных пород в горной выработке. В результате обрушения события могут развиваться следующим образом:

1 – возможно повреждение токопроводящего кабеля (вероятность  $P_1$ ) или не повреждение кабеля с вероятностью  $S_1$ ;

2 – при повреждении кабеля возможна остановка вентилятора местного проветривания (ВМП), подающего воздух в забой подготовительной выработки, с вероятностью  $P_2$  или его работа продолжается (вероятность  $S_2$ );

3 – в случае остановки ВМП возможно образование в забое взрывоопасной концентрации горючего газа (вероятность  $P_3$ ) или выделения метана недостаточно для образования взрывоопасной концентрации газов (вероятность  $S_3$ );

4 – при образовании взрывоопасной концентрации газов возможно появление искры, вызывающей взрыв (вероятность  $P_4$ ) или искра не появляется (вероятность  $S_4$ ).

Рассчитать вероятность возникновения всех возможных ситуаций. Исходные данные приведены в табл. 13.

Таблица 13

Исходные данные для выполнения задачи 3

Вариант	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
1	0,01	0,7	0,2	0,1	0,99	0,3	0,8	0,9
2	0,02	0,71	0,19	0,12	0,98	0,29	0,81	0,88
3	0,04	0,73	0,18	0,11	0,96	0,27	0,82	0,89
4	0,05	0,74	0,16	0,13	0,95	0,26	0,84	0,87
5	0,07	0,76	0,14	0,14	0,93	0,24	0,86	0,86

Вариант	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
6	0,09	0,78	0,12	0,15	0,91	0,22	0,88	0,85
7	0,1	0,8	0,11	0,16	0,9	0,2	0,89	0,84
8	0,12	0,81	0,1	0,17	0,88	0,19	0,9	0,83
9	0,14	0,82	0,09	0,18	0,86	0,18	0,91	0,82
10	0,16	0,84	0,08	0,19	0,84	0,16	0,92	0,81
11	0,18	0,88	0,06	0,2	0,82	0,12	0,94	0,8
12	0,2	0,9	0,05	0,11	0,8	0,1	0,95	0,89
13	0,22	0,91	0,04	0,09	0,78	0,09	0,96	0,91
14	0,24	0,83	0,03	0,08	0,76	0,17	0,97	0,92
15	0,25	0,85	0,02	0,07	0,75	0,15	0,98	0,93
16	0,23	0,89	0,01	0,06	0,77	0,11	0,99	0,94
17	0,17	0,75	0,008	0,05	0,83	0,25	0,992	0,95
18	0,26	0,72	0,007	0,04	0,74	0,28	0,993	0,96
19	0,15	0,92	0,006	0,03	0,85	0,08	0,994	0,97
20	0,27	0,79	0,004	0,02	0,73	0,21	0,996	0,98

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите, что такое надежность?
2. Какие основные причины отказов.
3. Чем отличаются исправное и работоспособное состояние системы?
4. На какие виды делятся отказы технических систем?
5. Как определяют величину индивидуального риска?
6. Как разделяются риски по степени допустимости?
7. Назовите основные этапы построения дерева отказов.
8. Каков порядок построения дерева событий?
9. Как рассчитать вероятность события при построении дерева событий?

## ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко, С. П. Надежность технических систем и техногенный риск : учебник и практикум для вузов / С. П. Тимошенко, Б. М. Симонов, В. Н. Горошко. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 502 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-9916-8582-5. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/489439>.

2. Гуськов, А. В. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / А. В. Гуськов, К. Е. Милевский. — Новосибирск : НГТУ, 2016. — 424 с. — ISBN 978-5-7782-3011-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118090>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Резникова, И. В. Надежность технических систем и техногенный риск : учебнометодическое пособие / И. В. Резникова. — Тольятти : ТГУ, 2018. — 165 с. — ISBN 978-5-8259-1224-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/139930>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Белинская, И. В. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / И. В. Белинская, В. Я. Сковородин. — Санкт-Петербург : СПбГАУ, 2017. — 82 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/162809>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Шишмарёв, В. Ю. Надежность технических систем : учебник для вузов / В. Ю. Шишмарёв. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 289 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-09368-1. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/493101>.

3. Белов, П. Г. Техногенные системы и экологический риск : учебник и практикум для вузов / П. Г. Белов, К. В. Чернов ; под общей редакцией П. Г. Белова. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 366 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-00605-6. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/489870>.

4. Надежность горных машин и оборудования : учебное пособие для студентов специальности 150402 «Горные машины и оборудование» очной формы обучения / А. А. Хорешок [и др.]; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. горн. машин и комплексов. — Кемерово : Издательство КузГТУ, 2012. — 131 с. — URL: <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90727&type=utchposob:common>. — Текст : электронный.

5. Николаев, А. К. Надежность горных машин и оборудования : учебное пособие для вузов / А. К. Николаев, С. Л. Иванов, В. В. Габов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 100 с. — ISBN 978-5-8114-9150-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/187692>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

6. Карепов, В. А. Надежность горных машин и оборудования : учебное пособие / В. А. Карепов, Е. В. Безверхая, В. Т. Чесноков. — Красноярск : СФУ, 2012. — 134 с. — ISBN 978-5- 7638-2651-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/45700>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7. Надежность горных машин и оборудования : учебное пособие / А. А. Хорешок, Г. Д. Буялич, Е. В. Прейс, Ю. В. Дрозденко. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2012. — 131 9 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/115180>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Обеспечение надежности сложных технических систем : учебник / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов, О. Л. Шестопалова. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-1108-5. — Текст : электронный // Лань : электроннобиблиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/167412>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

9. Малафеев, С. И. Надежность технических систем. Примеры и задачи : учебное пособие / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 316 с. — ISBN 978-5-8114-1268-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/168982>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

## ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПРАВОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

1. Электронная библиотека КузГТУ <https://elib.kuzstu.ru/>
2. Электронная библиотечная система «Лань» <http://e.lanbook.com>
3. Электронная библиотечная система Новосибирского государственного технического университета [https://library.kuzstu.ru/method/ngtu\\_metho.html](https://library.kuzstu.ru/method/ngtu_metho.html)
4. Электронная библиотечная система «Юрайт» <https://urait.ru/>

Составитель

Белов Валерий Федорович

**Надежность технических систем и техногенный риск**  
Программа курса и методические указания для практической  
работы для обучающихся всех форм обучения  
направления 20.03.01 «Техносферная безопасность»

Печатается в авторской редакции

