

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»
Факультет компьютерного проектирования
Кафедра инженерной психологии и эргономики

А. Г. Давыдовский

***БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕХНОСФЕРНЫХ РИСКОВ***

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности 1-59 81 01
«Управление безопасностью производственных процессов»*

Минск БГУИР 2018

УДК [331.45+502.22-047.58](075)
ББК (65.247+20.1)я73
Д13

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра охраны труда Белорусского национального технического университета
(протокол №7 от 20.03.2017);

директор Института повышения квалификации и переподготовки учреждения
образования «Белорусский государственный технологический университет»,
кандидат технических наук, доцент С. Н. Пищов

Давыдовский, А. Г.

Д13 **Безопасность производственной деятельности. Системный анализ
техносферных рисков : пособие / А. Г. Давыдовский. – Минск : БГУИР,
2018. – 72 с. : ил.
ISBN 978-985-543-366-9.**

Содержит краткие теоретические сведения и методические указания по выполнению
лабораторных работ, предназначенные для студентов и преподавателей.

**УДК [331.45+502.22-047.58](075)
ББК (65.247+20.1)я73**

ISBN 978-985-543-366-9

© Давыдовский А. Г., 2018
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа №1. Методические основы системного анализа техносферных рисков.....	5
Лабораторная работа №2. Анализ и оценка надежности сложноструктурных объектов техносферы.....	13
Лабораторная работа №3. Анализ и оценка риска аварий на объектах нефтегазового комплекса.....	24
Лабораторная работа №4. Системный анализ риска пожаров на объектах техносферы.....	31
Лабораторная работа №5. Критерии оценки и управления техносферными рисками в условиях информационной неопределенности	36
Лабораторная работа №6. Логико-вероятностный анализ надежности систем электроснабжения.....	45
Лабораторная работа №7. Анализ вероятности разрушений зданий и сооружений при авариях на объектах техносферы.....	54
Лабораторная работа №8. Управление системными рисками при эксплуатации опасных производственных объектов.....	60
Приложение 1	69
Приложение 2	70
Литература	71

Введение

Данное пособие включает лабораторные работы по важнейшим вопросам анализа и оценки риска аварийных ситуаций на объектах техносферы в различных областях производственной деятельности.

В настоящем пособии рассмотрены методические основы системного анализа техносферных рисков, достаточно подробно освещены вопросы анализа и оценки надежности сложноструктурных объектов техносферы, анализа и оценки риска пожаров и взрывов на объектах техносферы. Кроме того, представлены и обоснованы подходы к анализу и оценке риска аварий на объектах нефтегазового комплекса, а также к анализу вероятности разрушений зданий и сооружений при авариях на объектах техносферы, охарактеризованы основы логико-вероятностного анализа надежности электроэнергетических систем, а также изложены идеи квалиметрического моделирования и интегральной оценки техносферных рисков в условиях неопределенности, а также управление системными рисками при эксплуатации опасных производственных объектов.

Каждая лабораторная работа сопровождается заданиями для самостоятельной работы, закрепления теоретических знаний и вопросами для самоконтроля.

Лабораторная работа №1

Методические основы системного анализа техносферных рисков

Цель работы – освоение представлений об основных качественных методах системного анализа рисков инцидентов, аварий и катастроф технических систем и техносферных объектов.

Теоретические сведения

Техносфера – это область биосферы и околоземного пространства планеты, преобразованная человеком с помощью прямого или косвенного влияния технических средств с целью наибольшего соответствия своим материальным и социально-экономическим нуждам. Современная техносфера включает промышленные и селитебные зоны, транспортные системы, узлы и магистрали, торговые и культурно-бытовые зоны и отдельные помещения, электростанции систем электро- и теплоснабжения, теплоцентрали, рекреационные зоны и т. д.

Техносфера включает производственную среду, которая обладает повышенной концентрацией негативных факторов, наибольшая концентрация которых наблюдается в сфере производства.

Методические рекомендации к выполнению работы

Для решения задач системного анализа рисков при эксплуатации техносферных объектов различного назначения широко используются методы проверочного листа, «Что будет, если...?», методы «Анализ опасности и работоспособности», «Анализ вида и последствий отказов», «Анализ вида, последствий и критичности отказа», оценки риска HAZOP, оценки риска HAZID, RCM, RBI, RCA, PHSER. Рассмотрим их подробнее.

1. Методы проверочного листа и «Что будет, если..?» или их комбинация относятся к группе методов качественных оценок опасности, основанных на изучении соответствия условий эксплуатации объекта или проекта требованиям промышленной безопасности. Результатом проверочного листа является перечень вопросов и ответов о соответствии опасного производственного объекта (ОПО) требованиям промышленной безопасности и указания по их обеспечению. Метод проверочного листа отличается от «Что будет, если..?» более обширным представлением исходной информации и представлением результатов о последствиях нарушений безопасности.

2. Метод «Анализ опасности и работоспособности» (AOP) направлен на анализ влияния отклонений технологических параметров (температуры,

давления и пр.) от регламентных режимов с точки зрения возможности возникновения опасности. АОР по сложности и качеству результатов соответствует уровню АВПО, АВПКО (см. ниже). АОР рекомендуется для применения при выполнении анализа с высоким уровнем капитальных затрат, а также проектов при реконструкции ОПО, документации на техническое перевооружение ОПО, а именно:

- для действующих техносферных объектов, если на них планируется выполнить реконструкцию или техническое перевооружение, риски которых необходимо оценить (например, изменение технологического процесса, изменения в системе управления и (или) автоматизации, замена оборудования, конструктивно отличного от существующего);

- для действующих объектов после аварий (инцидентов), требующих уточнения риска аварии, в целях проведения детального исследования используемой технологии, оборудования и систем автоматизации технологического процесса, выявления нарушений технологической безопасности и достаточности предусмотренных мер защиты.

Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы анализа «деревьев отказов» и «деревьев событий».

3. Метод анализа «деревьев неисправностей» (АДН) позволяет выявить комбинации отказов (неполадок) оборудования, инцидентов, ошибок персонала и нерасчетных внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к головному событию (аварийной ситуации). Метод используется для анализа возможных причин возникновения аварийной ситуации и расчета ее частоты (на основе знания частот исходных событий). По-другому метод АДН нередко традиционно называется метод **анализа «дерева отказов» (АДО)**. При анализе «дерева отказа» (аварии) рекомендуется определять минимальные сочетания событий, определяющие возникновение или невозможность возникновения аварии.

4. Метод анализа «дерева событий» (АДС) – алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации). Используется для анализа развития аварийной ситуации. Частота каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события (например, аварии с разгерметизацией оборудования с горючим веществом в зависимости от условий могут развиваться как с воспламенением, так и без воспламенения вещества).

5. Метод оценки риска HAZOP (Hazard and Operability Analysis –

анализ опасностей и работоспособности) – анализ эксплуатационной безопасности и работоспособности – общий процесс идентификации риска с дальнейшим определением отклонений от ожидаемых эксплуатационных показателей, детальной и структурированной идентификацией опасностей для отдельных технологических систем.

6. Метод оценки риска HAZID (Hazard Identifications Studies – исследования идентификации опасности) – процедура идентификации опасностей (инструмент распознавания рисков, который используется на ранних стадиях реализации проекта сразу после создания чертежей, расчета материального баланса и подготовки схемы участка).

7. Метод RCM (Reliability Centered Maintenance – ремонты, ориентированные на надежность) направлен на надежность-ориентированное техническое обслуживание и выбор политики предупреждения отказов, нацеленной на эффективное обеспечение требований безопасности, готовности и экономичной эксплуатации.

8. Метод RBI (Risk Based Inspections – проверки на основе оценки рисков) направлен на контроль технического состояния, в котором объем, способы и периодичность контроля технического состояния задаются по результатам анализа риска эксплуатации технических устройств.

9. Метод RCA (Root Cause Analysis) – анализ потерь, составляющих основную долю ущерба, направленный на предотвращение их повторного возникновения, который называется анализом первопричины, или анализом коренных причин.

10. Метод PHSER (Project Health Safety Environment Review – обзор проектирования здоровья персонала, безопасности производства и окружающей среды) – анализ безопасности и определения рисков безопасности, охраны труда, здоровья персонала и экологии проекта на основе требований производственной и экологической безопасности, охраны труда и гражданской защиты, поддержка и мониторинг проектных решений по устранению или смягчению последствий зафиксированных рисков.

11. Анализ вида и последствий отказов (АВПО) применяется для качественного анализа опасности рассматриваемой технической или производственно-технологической системы. Под технической системой в зависимости от целей анализа могут пониматься как совокупность технических устройств, так и отдельные технические устройства или их элементы. Существенной чертой этого метода является рассмотрение отказа каждого аппарата (установки, блока, изделия) или составной части системы (элемента).

12. Анализ вида, последствий и критичности отказа (АВПКО). Вид отказа ранжируется с учетом двух составляющих критичности – вероятности (или частоты) и тяжести последствий отказа (или иного события). Определение параметров критичности необходимо для выработки рекомендаций и приоритетности мер безопасности. В табл. 1 в качестве примера приведены показатели (индексы) уровня и критерии критичности по вероятности и тяжести последствий отказа.

Таблица 1

Матрица «вероятность/тяжесть последствий»

Частота возникновения отказа в год		Тяжесть последствий отказов			
		катастрофический отказ	критический отказ	некритический отказ	отказ с пренебрежимо малыми последствиями
Частый отказ	> 1	А	А	А	С
Вероятный отказ	$1 - 10^{-2}$	А	А	В	С
Возможный отказ	$10^{-2} - 10^{-4}$	А	В	В	С
Редкий отказ	$10^{-4} - 10^{-6}$	А	В	С	Д
Практически невероятный отказ	$< 10^{-6}$	В	С	С	Д

Категории (критичность) отказов

«А» – неприемлемый риск, обязателен более детальный, повторный анализ риска и/или требуются особые меры обеспечения безопасности.

«В» – приемлемый риск, требующий снижения, желателен более детальный анализ риска или требуется принятие определенных мер безопасности.

«С» – приемлемый риск, который желательно снизить, рекомендуется проведение принятия некоторых мер безопасности.

«Д» – приемлемый риск, анализ и принятие дополнительных (к существующим) мер безопасности не требуется.

Методы АВПО, АВПКО выполняются группой специалистов различного профиля (например, специалист по технологии, химическим процессам, специалист КИПиА, инженер-механик) из 3 – 7 человек в течение нескольких дней, недель.

Пример 1. Анализ «дерева событий» и «дерева отказа».

Пример «дерева событий» для количественного анализа различных сценариев аварий на установке переработки нефти представлен на рис. 1. Цифры рядом с наименованием события показывают условную вероятность

возникновения этого события. Вероятность возникновения инициирующего события (выброс нефти из резервуара) принята равной 1.

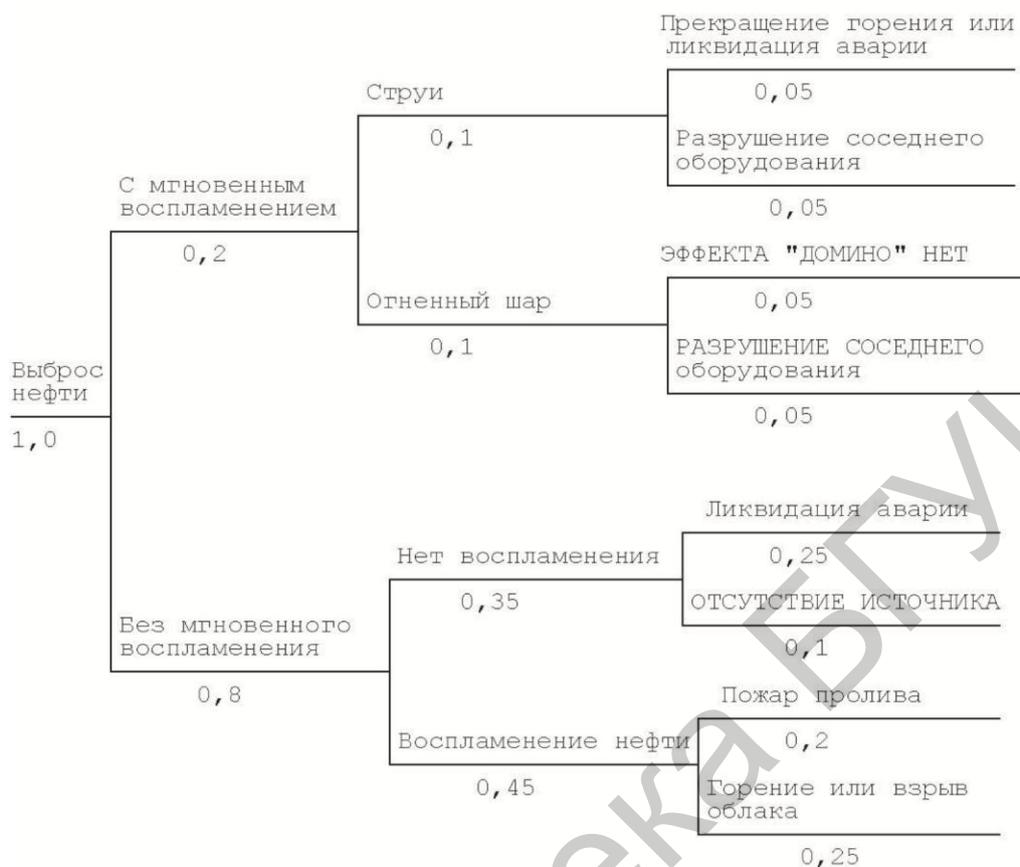


Рис. 1. «Дерево событий» аварий на установке переработки нефти

Пример 2. Пример «дерева отказов» для сценария развития аварийной ситуации (отказа) на автозаправочной станции представлен на рис. 2. В литературе встречаются и иные наименования этого «дерева»: «дерево отказов», «дерево неполадок», «дерево происшествий» и т. п. Метод «дерева отказов» основан на нахождении и расчете множеств *минимальных сечений*. *Сечением* называют такое множество элементов, суммарный отказ которых приводит к отказу системы. *Минимальное сечение* – такое множество элементов, из которого нельзя удалить ни одного элемента, иначе оно перестает быть сечением.

Минимальные пропускные сочетания (МПС) – это набор исходных событий-предпосылок (на рис. 2 отмечены цифрами), обязательное (одновременное) возникновение которых достаточно для появления головного события (инцидента, отказа, аварии, катастрофы). МПС используются для выявления «слабых» мест в функционировании технических систем и техносферных объектов.

«Дерево отказов» имеет промежуточные события (прямоугольники),

тогда как в нижней части «дерева» кругами с цифрами показаны постулируемые исходные события-предпосылки, наименование и нумерация которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные события или состояния производственного процесса

№ п/п	Наименование события или состояния производственного процесса	Вероятность события P_i
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)	0,0005
2	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы	0,00001
3	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее воздействие)	0,0001
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера	0,0003
6	Отказ датчика уровня	0,0002
7	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД (ошибка оператора)	0,005
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД (ошибка оператора)	0,001
9	Оператор не знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени	0,001
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени заправки	0,004
11	Отказ хронометра	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насоса	0,00001
13	Обрыв цепей управления приводом насоса	0,00001

Анализ «дерева отказа» позволяет выделить ветви прохождения сигнала к головному событию и указать связанные с ними минимальные пропускные сочетания, минимальные отсечные сочетания. Минимальные отсечные сочетания – набор исходных событий, который гарантирует отсутствие головного события при условии невозникновения ни одного из составляющих этот набор событий: {1•2•3•4•5•12•13}, {1•2•3•4•6•12•13}, {7•8•9•10•11•12•13}. Используются главным образом для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии. В табл. 3 представлены рекомендации по выбору методов анализа риска для различных видов деятельности и этапов функционирования опасного производственного объекта (ОПО).

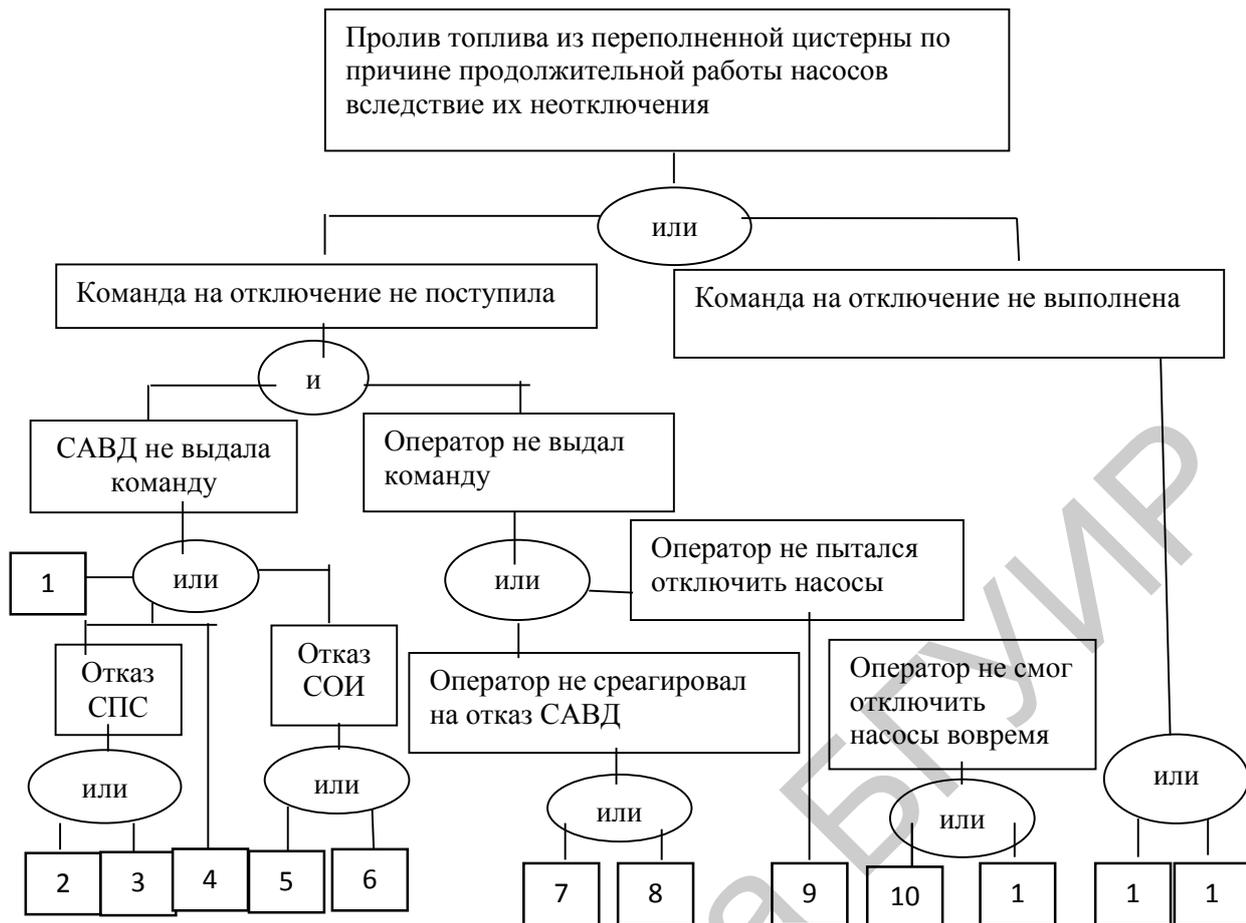


Рис. 2. «Дерево отказа» автозаправочной операции (пример 2):
 САВД – система автоматической выдачи дозы; СОИ – средства отображения информации; СПС – средства проведения сигнала;
 □ – отказы подсистем, которые можно анализировать далее

Таблица 3

Рекомендации по выбору методов анализа риска

Метод	Вид деятельности				
	Разме- щение	Проекти- рование	Ввод или вывод из эксплуа- тации	Эксплуа- тация	Реконст- рукция
Анализ «Что будет, если..?»	0	+	++	++	+
Метод проверочного листа	0	+	+	++	+
Анализ опасности и работоспособности	0	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отказов	0	++	+	+	++
Анализ «деревьев отказов и событий»	0	++	+	+	++
Количественный анализ риска	++	++	0	+	++

Примечание: «0» – наименее подходящий метод анализа; «+» – рекомендуемый метод; «++» – наиболее подходящий метод.

Задания для самостоятельной работы

1. Составьте таблицу исходных событий и предложите их вероятности для ситуации автотранспортного инцидента на железнодорожном переезде при столкновении автоцистерны с заглушим двигателем, содержащей такое аварийно химически опасное вещество (АХОВ), как хлор, с движущимся электропоездом. В результате столкновения произошла разгерметизация автоцистерны.

2. Составьте «дерево событий» для ситуации, описанной в задании 1. Используйте те же значения вероятности для таблицы вероятности событий.

Рассмотрите следующие варианты:

а) водитель автоцистерны с АХОВ не заметил световой сигнализации, запрещающей движение автотранспортных средств через железнодорожный переезд перед приближающимся поездом (возможно, водитель отвлекся, был нездоров, была неисправна световая сигнализация переезда; дежурный по переезду не подал ее вовремя; была плохая видимость из-за погоды или других транспортных средств); при этом запрещающий шлагбаум был поднят (возможно, из-за неисправности поворотного механизма);

б) во время штатного движения автоцистерны через железнодорожный переезд произошла аварийная остановка ее двигателя; при этом автоцистерна с заглушим двигателем не была своевременно отбуксирована с железнодорожных путей (возможно, отсутствовал буксировочный трос; возможно, было поломано буксировочное устройство для крепления троса на автоцистерне).

3. Составьте «дерево отказа» для ситуации автотранспортного инцидента для условий, описанных в заданиях 1 и 2.

Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте значение методов «Проверочного листа» и «Что будет, если...?» для качественного анализа техносферных рисков.

2. Охарактеризуйте значение методов «Анализ опасности и работоспособности» для качественного анализа техносферных рисков.

3. В чем заключается смысл метода анализа «дерева отказов»?

4. В чем заключается смысл метода анализа «дерева событий»?

5. Охарактеризуйте метод оценки риска HAZOP и HAZID.

6. Охарактеризуйте методы RCM, RBI, RCA и PHSER.

Лабораторная работа №2

Анализ и оценка надежности сложноструктурных объектов техносферы

Цель работы – освоение навыков анализа надежности технических систем и техносферных объектов, обладающих сложной структурной организацией, таких как информационные и телекоммуникационные системы.

Теоретические сведения

Надежность – комплексное свойство технических систем и техносферных объектов (ТО), характеризующее его способность выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения всех эксплуатационных параметров.

Надежность технических систем и ТО характеризуется следующими состояниями:

– *исправное состояние* – состояние Т, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документацией;

– *работоспособное состояние* – состояние ТО, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных нормативно-технической документацией;

– *неработоспособное состояние* – состояние ТО, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) проектной документацией;

– *предельное состояние* – состояние ТО, при котором его применение (использование) по назначению недопустимо или нецелесообразно;

– *повреждение* – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния ТО при сохранении его работоспособного состояния;

– *отказ* – событие, обуславливающее нарушение работоспособного состояния ТО;

– *списание* – состояние, для которого характерна невозможность функционирования и восстановления ТО после отказа.

Методические рекомендации к выполнению работы

Реальные объекты техносферы состоят из совокупности взаимосвязанных элементов, блоков, подсистем. В производственной системе элементы физически могут быть соединены параллельно, однако с позиций надежности они могут соединяться как параллельно, так и последовательно.

Последовательным (основным) соединением элементов по надежности называется такое соединение, при котором выход из строя хотя бы одного из них приводит к отказу всей системы, т. е. последовательная структура работоспособна, если все ее элементы работоспособны. Схема замещения (по надежности) системы с последовательной структурой представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема замещения системы с последовательной структурой

Вероятность безотказной работы системы (БРС) на основе последовательной структуры, включающей i компонентов, будет определяться по теореме умножения вероятностей:

$$P_{\text{БРС}} = P_1(t)P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность работы i -го элемента; n – число элементов.

Вероятность отказа последовательной структуры

$$Q_C(t) = 1 - P_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Q_i(t)], \quad (2)$$

где Q_i – вероятность отказа i -го элемента.

Если все элементы структуры равнонадежны, т. е. $P_i(t) = P(t)$, $Q_i(t) = Q(t)$, значит, формулы (1) и (2) принимают вид

$$P_C(t) = [P(t)]^n, \quad (3)$$

$$Q_C(t) = 1 - [1 - Q_i(t)]^n. \quad (4)$$

Вероятность безотказной работы для экспоненциального закона распределения времени при постоянной интенсивности отказов каждого элемента

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp[-t \sum_{i=1}^n \lambda_i]. \quad (5)$$

Интенсивность отказов системы с последовательной структурой в целом можно определить по формуле

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n. \quad (6)$$

Среднее время безотказной работы системы

$$T_C = \frac{1}{\lambda_C} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (7)$$

где T_i – среднее время безотказной работы i -го элемента.

Среднее время восстановления системы (ВС)

$$T_{\text{ВС}} = \frac{1}{\lambda_C} \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{\text{Ви}} = T_C \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{\text{Ви}}, \quad (8)$$

где T_{Vi} – время восстановления i -го элемента, является математическим ожиданием времени восстановления, взвешенным по интенсивности отказов λ последовательно соединенных элементов.

Параллельным соединением элементов в смысле надежности называется структура, отказ которой наступает при отказе всех элементов, входящих в нее. Схема замещения (по надежности) системы с параллельной структурой представлена на рис. 4. При отказе одного или нескольких элементов функция структуры выполняется оставшимися в работе элементами, если последние удовлетворительно выполняют функции отказавших.

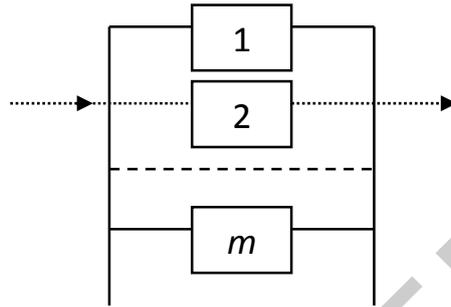


Рис. 4. Схема замещения системы с параллельной структурой

В общем случае отказ параллельной структуры предполагает, что все m элементов находятся в состоянии простоя:

$$Q_C = \prod_{i=1}^m Q_i(t) = Q_1(t)Q_2(t) \dots Q_m(t). \quad (9)$$

Вероятность безотказной работы системы

$$P_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^m Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)]. \quad (10)$$

При равнонадежных элементах [$P_i(t) = P(t)$, $Q_i(t) = Q(t)$]:

$$Q_C(t) = [Q(t)]^m, \quad (11)$$

$$P_C(t) = 1 - [1 - P(t)]^m. \quad (12)$$

Число параллельно соединенных элементов в технических системах чаще всего больше трех. Поэтому вероятность того, что будут работать один или два элемента (при $m = 2$):

$$P_C(t) = P_1(t) - P_2(t) - P_1(t)P_2(t). \quad (13)$$

Вероятность отказа обоих элементов

$$Q_C(t) = Q_1(t)Q_2(t) = [1 - P_1(t)][1 - P_2(t)] = 1 - P_C(t). \quad (14)$$

Интенсивность отказов системы, состоящей из n параллельно соединенных компонентов с постоянной интенсивностью отказов λ_0 :

$$\lambda = \frac{dQ(t)dt}{P(t)} = \frac{d(1 - \exp(-\lambda_0 t))^n}{(1 - (1 - \exp(-\lambda_0 t))^n)dt} = \frac{n\lambda_0(1 - \exp(-\lambda_0 t))^{n-1}}{1 - (1 - \exp(-\lambda_0 t))^n}. \quad (15)$$

Интенсивность отказов устройства при $n > 1$ зависит от t (стремится к нулю при $t = 0$ и монотонно возрастает до λ_0 при увеличении t). Среднее время безотказной работы системы T_0 в интервале $[0, \infty]$:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t)) \right\} dt = \left\{ \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \right\} - \left\{ \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} + \dots \right\} + \left\{ \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_4} + \dots \right\} + \frac{(-1)^{m+1}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (16)$$

Пример. Два одинаковых блока в системе очистки воды ОПО работают параллельно. Если один из них выходит из строя, то другой может работать при полной системной нагрузке. Необходимо найти вероятность безотказной работы системы в течение 400 ч, при условии, что интенсивности отказов блоков постоянны и равны $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$. Оба блока начинают работать в момент времени $t = 0$ и их отказы статистически независимы.

Решение. В случае двух идентичных элементов:

$$P(t) = 2 \exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t).$$

Поскольку $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$ и $t = 400 \text{ ч}$, то

$$P_{(400)} = 2 \exp(-0,0005 \cdot 400) - \exp(-2 \cdot 0,0005 \cdot 400) = 0,9671.$$

Среднюю наработку на отказ находим, используя (16):

$$T_0 = 1/\lambda(1 + 1/2) = 1/\lambda \cdot 3/2 = 1,5/0,0005 = 3000 \text{ ч}.$$

Мостиковая структура является одним из наиболее сложных по соединению элементов, при котором нарушение функционирования техносферного объекта наступает только при определенных сочетаниях одновременных отказов компонентов, входящих в мостиковую систему, представленную на рис. 5. Мостиковая структура не сводится к параллельному или последовательному типу соединения элементов, а представляет собой параллельное соединение последовательных цепочек элементов с диагональными.

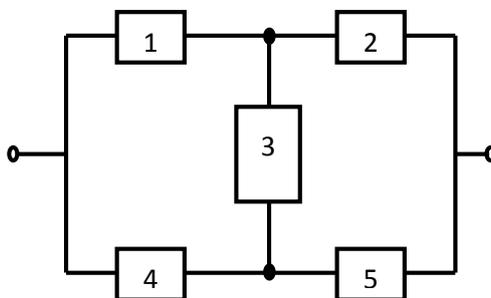


Рис. 5. Система с элементами, соединенными по мостиковой схеме

Вероятность безотказной работы такой системы определяется по формуле

$$P_C = 2P_1P_2P_3P_4P_5 - P_2P_3P_4P_5 - P_1P_3P_4P_5 - P_1P_2P_4P_5 - P_1P_2P_3P_5 - P_1P_2P_3P_4 + P_1P_3P_5 + P_2P_3P_4 + P_1P_4 + P_2P_5. \quad (17)$$

В случае одинаковых элементов эта формула принимает вид

$$P_C = 2P^5 - 5P^4 + 2P^3 + 2P^2.$$

Подставляя в формулу вероятность безотказной работы элемента $P(t) = \exp(-\lambda t)$, в случае $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$ можно получить

$$P_C = 2 \exp(-5\lambda t) - 5 \exp(-4\lambda t) + 2 \exp(-3\lambda t) + 2 \exp(-2\lambda t). \quad (18)$$

Преобразование конфигурации «треугольник» в конфигурацию «звезда», и наоборот. На практике часто встречаются так называемые мостиковые схемы, которые содержат конфигурации элементов типа «треугольник» и «звезда». Такие схемы встречаются, например, в схемах электрических соединений подстанций и распределительных устройств. Для расчета надежности таких схем существуют методы преобразования «треугольника» в «звезду» и обратно, которые являются приближенным. На рис. 6 представлены примеры преобразования «звезды» в «треугольник». Вероятности отказов для цепей при условии, что точка 3 присоединена к точке 2, будут равны для «звезды» $q_1 + q_2q_3 - q_1q_2q_3$, а для «треугольника» $q_{12}q_{31}$. Аналогично можно записать равенства и для двух других возможных вариантов соединения точек.

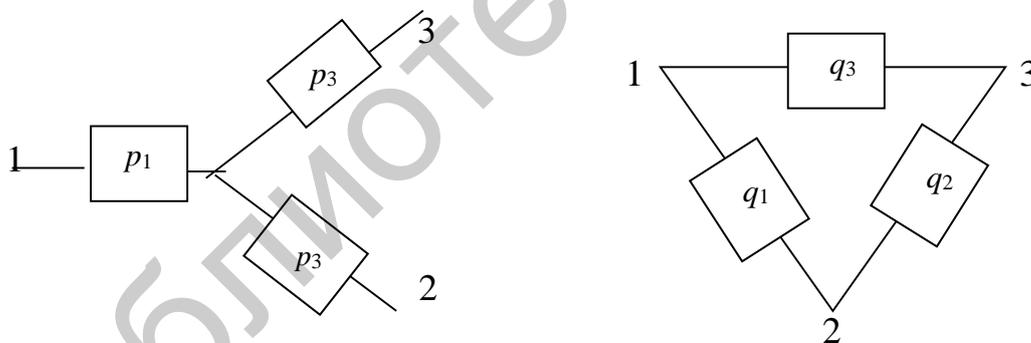


Рис. 6. Преобразование «звезды» в «треугольник»

Можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} q_1 + q_2q_3 - q_1q_2q_3 &= q_2q_3; \\ q_1 + q_3q_1 - q_1q_2q_3 &= q_{23}q_{12}; \\ q_3 + q_1q_2 - q_1q_2q_3 &= q_{31}q_{23}. \end{aligned} \quad (19)$$

Пренебрегая произведениями $q_i q_j$ и $q_i q_j q_l$ как вероятностями более высокого порядка малости, чем q_i , получим следующие приближенные выражения:

$$q_1 = q_{12} q_{31}; \quad q_2 = q_{23} q_{13}; \quad q_3 = q_{31} q_{23}. \quad (20)$$

Перемножив соответственно левые и правые части двух первых равенств системы (19) и разделив на третье равенство, получим

$$\frac{q_1 q_2}{q_3} = \frac{q_{12} q_{31} q_{23} q_{12}}{q_{31} q_{23}}, \quad (21)$$

после сокращения одинаковых сомножителей

$$q_{12} \approx \sqrt{\frac{q_1 q_2}{q_3}}. \quad (22)$$

Аналогично получаем

$$q_{23} \approx \sqrt{\frac{q_2 q_3}{q_1}}; \quad q_{31} \approx \sqrt{\frac{q_3 q_1}{q_2}}. \quad (23)$$

Формулы (19)–(23) могут быть использованы в процессе преобразования схемы «треугольник» в «звезду» и наоборот.

Резервирование – это метод повышения надежности путем введения избыточности, т. е. дополнительных элементов для нормального выполнения объектом заданных функций. В этом случае отказ наступает только после отказа основного элемента и всех резервных.

Основной элемент – это элемент основной физической структуры объекта, который необходим для нормального выполнения объектом его задач.

Резервный элемент – это элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Резервирование часто используется на стадии проектирования техносферных объектов и их подсистем. Для обеспечения требуемой надежности приходится во многих случаях как минимум дублировать отдельные элементы, а иногда даже отдельные системы, т. е. использовать резервирование.

При **общем резервировании** основной объект (система) резервируется в целом, а при **раздельном** – резервируются отдельные части (элементы) системы, как показано на рис. 7. Под **кратностью резервирования** « m » понимается отношение числа резервных элементов к числу основных.

Кратность резервирования определяется из соотношения $m = \frac{l-n}{n}$, где l – число основных и резервных элементов; n – число основных элементов.

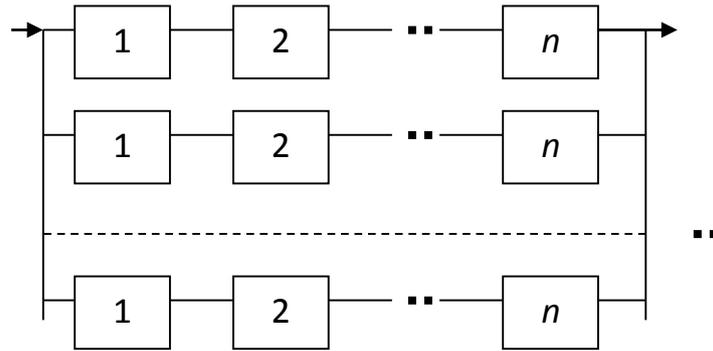


Рис. 7. Схема замещения при постоянном общем резервировании

Среднее время безотказной работы системы при общем резервировании

$$T_C = \lambda_C^{-1} = \lambda^{-1} \sum_{i=0}^m (i+1)^{-1}, \quad (24)$$

где λ_C – интенсивность отказов системы; $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ – интенсивность отказов любой из $m+1$ цепей; λ_i – интенсивность отказов i -го элемента. Для системы из двух параллельных цепей ($m=1$) формула (24) принимает вид

$$T_C = \frac{3}{2} \lambda. \quad (25)$$

Среднее время восстановления системы определяется по формуле

$$T_{BC} = \left(\sum_{i=0}^m T_{Bi}^{-1} \right)^{-1}, \quad (26)$$

где T_{Bi} – среднее время восстановления i -й цепи.

Для частного случая $T=1$ формула (26) принимает вид

$$T_{Bi} = T_{B1} T_{B2} (T_{B1} + T_{B2})^{-1}. \quad (27)$$

Расчет надежности при постоянном раздельном резервировании.

Схема замещения при постоянном раздельном резервировании технической системы показана на рис. 8. Вероятность отказа элементов i -го типа равна произведению вероятностей отказов i -го элемента и элементов, его резервирующих:

$$Q_i(t) = \prod_{i=1}^{m+1} q_i(t) = \prod_{i=1}^{m+1} (1 - p_i(t)). \quad (28)$$

Вероятность безотказной работы i -го и резервирующих его элементов

$$P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} (1 - p_i(t)). \quad (29)$$

Если резервные и резервируемые элементы равнонадежны ($p_i(t) = p(t), q_i(t) = q(t)$) P_i , то

$$P_i(t) = 1 - [1 - p_i(t)]^{m+1}. \quad (30)$$

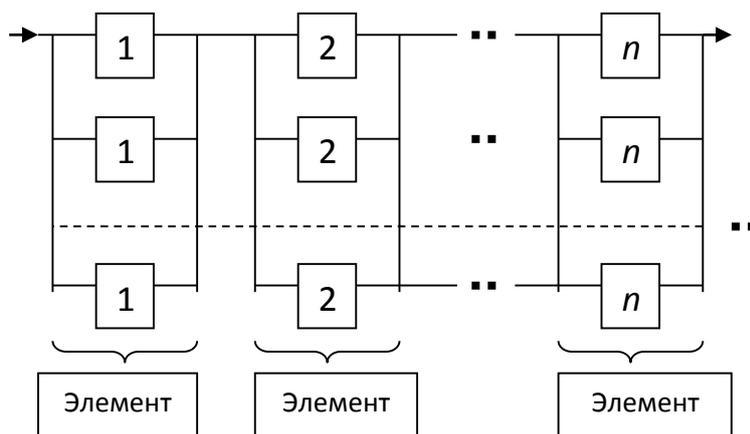


Рис. 8. Схема замещения при постоянном раздельном резервировании

Поскольку функциональные группы элементов соединены последовательно, то вероятность безотказной работы в целом равна произведению вероятностей безотказной работы функциональных групп, т. е.

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - p_i(t)]^{m+1} \right\}. \quad (31)$$

Если все элементы равнонадежны, то

$$P_C(t) = \left\{ 1 - [1 - p_i(t)]^{m+1} \right\}^n. \quad (32)$$

Примеры выполнения работы

Пример 1. Определить интенсивность отказов, среднее время восстановления, среднее время безотказной работы и вероятность безотказной работы в течение 1 года системы, состоящей из пяти последовательно соединенных элементов со следующими показателями надежности:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0,5 \text{ год}^{-1}; & T_{B1} &= 16 \text{ ч}; & \lambda_2 &= 0,32 \text{ год}^{-1}; & T_{B2} &= 8 \text{ ч}; \\ \lambda_3 &= 0,3 \text{ год}^{-1}; & T_{B3} &= 6 \text{ ч}; & \lambda_4 &= 0,64 \text{ год}^{-1}; & T_{B4} &= 12,5 \text{ ч}; \\ \lambda_5 &= 0,001 \text{ год}^{-1}; & T_{B5} &= 15 \text{ ч}. \end{aligned}$$

Решение. Интенсивность отказов системы, год^{-1} :

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^5 \lambda_i = 0,50 + 0,32 + 0,30 + 0,64 = 1,761.$$

Среднее время восстановления, ч:

$$T_{BC} = \lambda_C^{-1} \sum_{i=1}^5 \lambda_i \cdot T_{Bi} = 1,761^{-1} \cdot (0,50 \cdot 16,0 + 0,32 \cdot 8,0 + 0,30 \cdot 6,0 + 0,64 \cdot 12,5 + 0,001 \cdot 15,0) = 11,57.$$

Среднее время безотказной работы, ч:

$$T_C = \lambda_C^{-1} = \frac{1}{1,761} = 0,568 = 4974.$$

Вероятность безотказной работы за $t = 1$ год:

$$P_C(1) = \exp(-1,761 \cdot 1) = 0,17.$$

Пример 2. Определить вероятность безотказной работы системы, представленной на рис. 9, преобразованием «треугольника» в «звезду». Вероятности безотказной работы всех элементов одинаковы ($p_i = p = 0,9$).

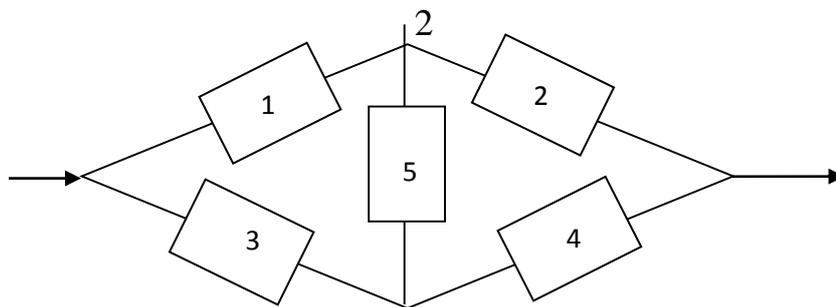


Рис. 9. Конфигурации двух «треугольников»

Решение. Образующий элементами 1, 3, 5 «треугольник» преобразуем в «звезду» с элементами 6, 7, 8 (рис. 10). Согласно формулам (29)–(30) определим вероятности отказов элементов «звезды»:

$$q_6 = q_7 = q_8 \approx q^2 \approx (1-p)^2 = (1-0,9)^2 = 0,01;$$

$$p_6 = p_7 = p_8 = 0,99.$$

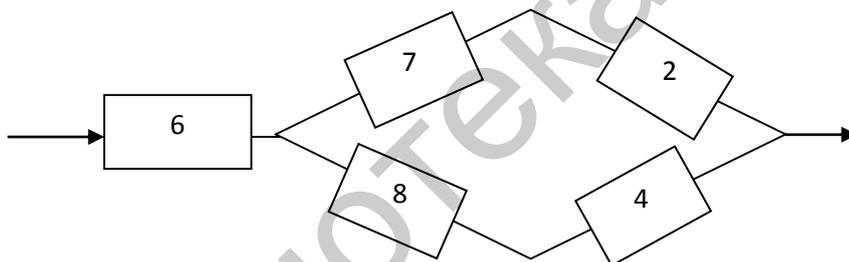


Рис. 10. Конфигурации последовательно-параллельно соединенных элементов

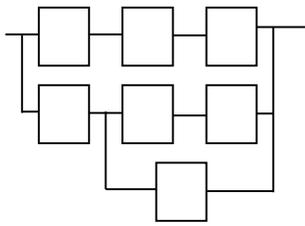
Используя формулы для последовательно-параллельно соединенных элементов, определить вероятность безотказной работы системы:

$$P_C = p_6 [1 - (1 - p_7 p_8)(1 - p_2 p_4)] = 0,99 [1 - (1 - 0,9 \cdot 0,99)(1 - 0,9 \cdot 0,99)]$$

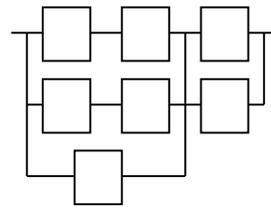
$$= 0,9782.$$

Задания для самостоятельной работы

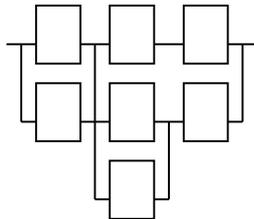
Используя формулы для последовательно-параллельно соединенных элементов, определяем вероятность безотказной работы для техносферных объектов, структурные схемы которых представлены на рис. 1–8. В табл. 4 представлены численные значения параметров надежности техносферных объектов к заданиям для самостоятельной работы.



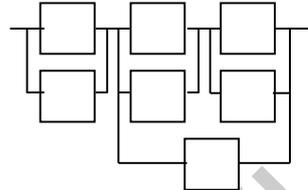
Вариант 1



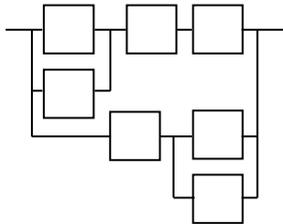
Вариант 2



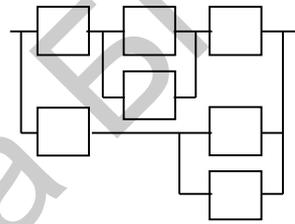
Вариант 3



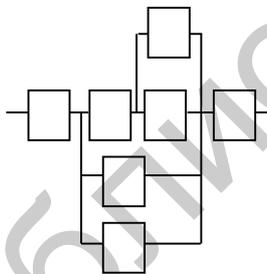
Вариант 4



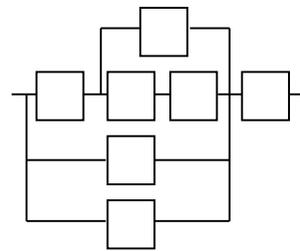
Вариант 5



Вариант 6



Вариант 7



Вариант 8

Таблица 4

Показатели интенсивности отказов элементов структурных схем объектов

Номер задания	Интенсивности отказов элементов, $\lambda = 10^{-6}/\text{ч}$						
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
1	7	15	10	13	12	15	7
2	11	10	11	14	9	10	6
3	9	9	13	10	15	9	4
4	11	13	9	12	10	13	1
5	15	3	5	9	11	3	2
6	14	11	9	13	7	11	7
7	15	1	7	13	12	15	12
8	13	15	10	14	9	11	11

Варианты заданий для самостоятельной работы представлены в табл. 5.

Таблица 5

Варианты заданий

Номер варианта	Номера заданий
1	1, 4, 7
2	2, 4, 6
3	3, 5, 7
4	4, 5, 6
5	5, 6, 7
6	1, 2, 6
7	2, 4, 8
8	3, 5, 6
9	1, 4, 7
10	2, 4, 8

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные состояния технической системы.
2. Охарактеризуйте основные виды отказов технической системы.
3. Охарактеризуйте понятие «надежность».
4. В чем общность и отличия состояний «исправность» и «работоспособность» технической системы?
5. Охарактеризуйте исправное состояние технической системы.
6. Что такое повреждение технической системы?
7. Охарактеризуйте неработоспособное состояние технической системы.
8. Что такое предельное состояние технической системы?
9. При каких условиях наступает предельное состояние технической системы?
10. Охарактеризуйте переходы между основными состояниями технических систем.

Лабораторная работа №3

Анализ и оценка риска аварий на объектах нефтегазового комплекса

Цель работы – освоение навыков системного анализа безопасности эксплуатации нефтегазового оборудования и трубопроводов на основе оценки показателей риска с помощью «деревьев событий» и «деревьев анализа причин», приводящих к возникновению аварийных ситуаций.

Теоретические сведения

Причинами аварий на объектах нефтегазового комплекса (НГК) чаще всего являются нарушения требований промышленной безопасности эксплуатирующими организациями. Алгоритм системного анализа аварийных ситуаций на объектах НГК обычно включает пять основных этапов.

Первый этап. Определение производственных объектов и производственно-технологических операций, представляющих наибольшую опасность. В частности, известно, что особую опасность на объектах НГК представляют технологические операции, связанные с транспортировкой и сливом-наливом нефтепродуктов.

Второй этап. Выяснение основных причин и факторов, связанных с отказами нефтегазового оборудования и трубопроводов. К ним относятся: производственные, технологические причины; коррозионный износ материала оборудования; физические факторы (физический износ, усталость материалов, механические повреждения, образование трещин, свищей, температурные деформации, дефекты изготовления); прекращение подачи энергоресурсов (электроэнергии, воздуха); внешние причины (пожар и пр.).

Кроме того, выбросы нефтепродуктов из стационарных объектов могут произойти по следующим причинам: разгерметизация из-за разрывов или нарушений герметичности железнодорожных и автоцистерн; нарушение герметичности наземных резервуаров и насосов; нарушение герметичности нефтегазового оборудования и трубопроводов; выбросы, вызванные пожарами, поломками нефтегазового оборудования и трубопроводов, предусмотренными или преднамеренными действиями.

Третий этап предусматривает построение «дерева событий», приводящих к аварийной ситуации или опасным последствиям при ее возникновении на объекте НГК.

Четвертый этап предусматривает количественный расчет рисков, построение «деревьев анализа причин», приводящих к реализации аварийных ситуаций на объектах НГК.

Пятый этап предусматривает построение «деревьев анализа причин», приводящих к реализации аварийных ситуаций на объектах НГК.

Методические рекомендации к выполнению работы

Согласно вышепредложенному алгоритму, на *первом этапе* системного анализа аварийных ситуаций на объектах НГК в качестве объекта исследования выбрана нефтебаза (участок слива-налива) для приема, хранения и отпуска светлых и темных нефтепродуктов. На *втором этапе* в качестве основной причины возникновения аварийной ситуации определена разгерметизация железнодорожной цистерны с нефтепродуктами. На рис. 11 представлен *третий этап* системного анализа аварийных ситуаций – составление «дерева событий», приводящих к опасным последствиям при разгерметизации железнодорожной цистерны с нефтепродуктами, в том числе возникновение топливно-воздушного облака (ТВО).



Рис. 11. «Дерево событий», приводящих к опасным последствиям при разгерметизации железнодорожной цистерны с нефтепродуктами

Допустим, в состав участка слива-налива входят резервуары для приема и хранения светлых и темных нефтепродуктов, а также насосная станция для приема светлых и темных нефтепродуктов, железнодорожная эстакада для приема светлых и темных нефтепродуктов, эстакада налива светлых нефтепродуктов в автоцистерны, тарный склад для приема и хранения фасованных нефтепродуктов. На основе «дерева событий» могут быть сформированы сценарии развития аварийных ситуаций.

На *четвертом этапе* проведена оценка риска с применением вероятностного метода определения опасности нефтегазового производства. В качестве риска обычно рассматривают показатель, включающий вероятность наступления нежелательного события в течение года и связанный с ним ущерб. Величину риска (R) можно определить по формуле

$$R = P \cdot U, \quad (33)$$

где P – вероятность наступления аварии, обусловленная событиями, приводящими к аварийным ситуациям, год⁻¹; U – потенциальный ущерб от аварии, р.

Для расчета вероятности развития аварии при последовательной взаимосвязи причин, приводящих к аварии:

$$P_{\text{аварии}} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (34)$$

при параллельной взаимосвязи причин аварийной ситуации:

$$P_{\text{аварии}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (35)$$

В табл. 6 представлены различные значения вероятности развития аварий при различных ситуациях на объектах НКГ:

- физический износ трубопроводов, $P = 0,1$;
- неблагоприятное влияние окружающей среды, $P = 0,1$;
- социально-экономические факторы, $P = 0,05$;
- некачественное проведение ремонтных работ, $P = 0,1$;
- несанкционированные действия, террористические угрозы, $P = 0,05$;
- ошибки производственного персонала, $P = 0,6$.

Таблица 6

Вероятность (P) возникновения аварийных ситуаций на объектах НКГ

Вариант события	События, способствующих развитию аварийных ситуаций на объектах НКГ	Значения вероятности (P)
1	Физический износ трубопроводов	$P = 0,1$
2	Неблагоприятное влияние окружающей среды	$P = 0,1$
3	Социально-экономические факторы	$P = 0,05$
4	Некачественное проведение ремонтных работ	$P = 0,1$
5	Несанкционированные действия, террористические угрозы	$P = 0,05$
6	Ошибки производственного персонала	$P = 0,6$

На *пятом этапе* системного анализа развития аварийных ситуаций на объекте НКГ формируются «деревья анализа причин» аварийных ситуаций на объектах НКГ, представленные на рис. 12–16.

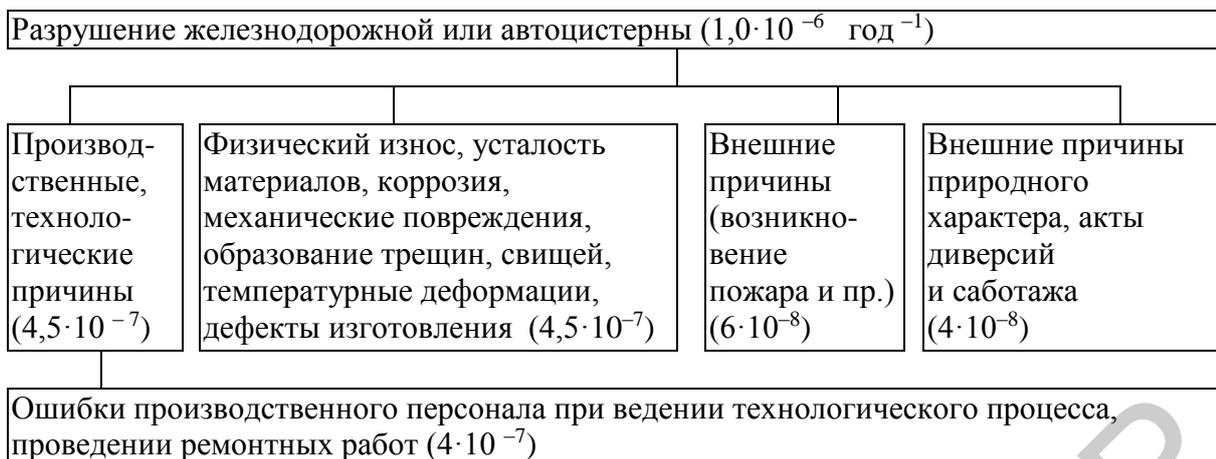


Рис. 12. «Дерево причин» аварийной ситуации разрушения железнодорожной или автоцистерны с нефтепродуктами

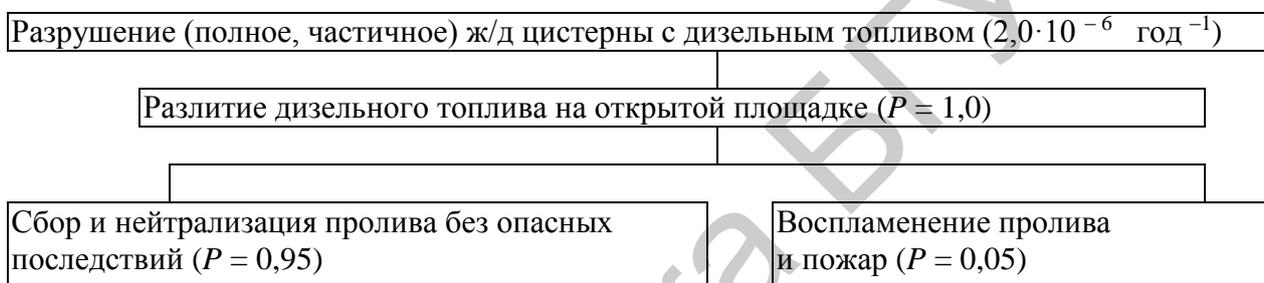


Рис. 13. «Дерево причин» аварий при разгерметизации железнодорожной цистерны с дизельным топливом

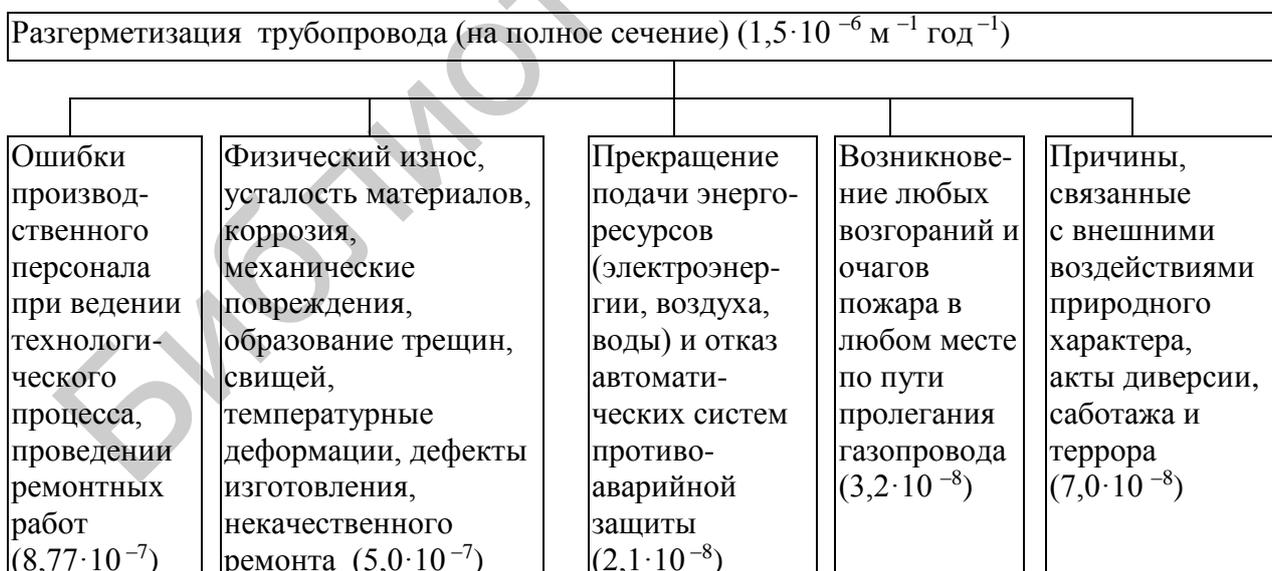


Рис. 14. «Дерево причин» аварийной ситуации разгерметизации трубопровода



Рис. 15. «Дерево причин» аварийной ситуации переполнения резервуара

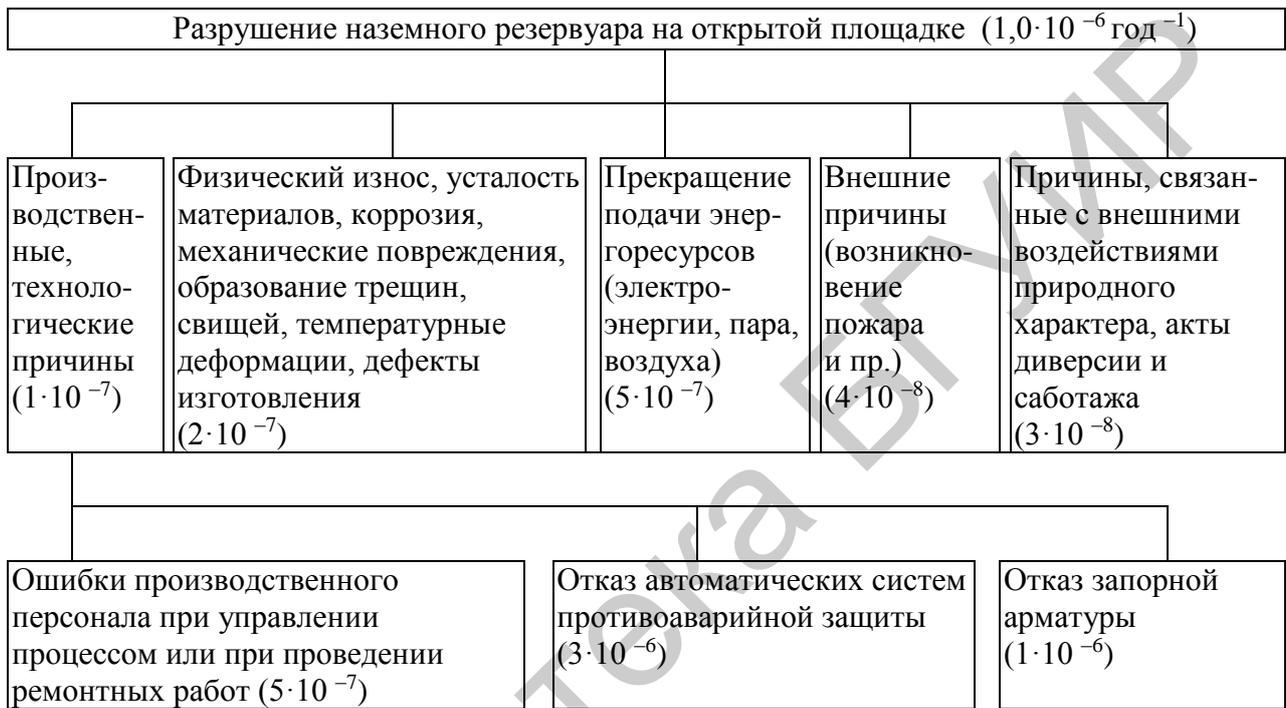


Рис. 16. «Дерево причин» аварийной ситуации разрушения резервуара

Задания для самостоятельной работы

Рассчитать величину риска аварийной ситуации, а также построить соответствующие им «деревья событий», используя данные к вариантам для самостоятельной работы в табл. 7.

Таблица 7

Данные к вариантам заданий для самостоятельной работы

Номер варианта	Величина ущерба (усл. ед.)	Аварийная ситуация	Частота события (10^{-6} год^{-1})	Вид «деревя причин»	Причина аварийной ситуации
1	3567,75	Разрушения автоцистерны с нефтепродуктами	5,5	Рис. 12	Физический износ
2	2889,5	Разрушение железнодорожной цистерны с дизельным топливом	2,75	Рис. 13	Террористические угрозы
3	3565,7	Разгерметизации трубопровода	3,5	Рис. 14	Влияние окружающей среды

Номер варианта	Величина ущерба (усл. ед.)	Аварийная ситуация	Частота события (10^{-6} год $^{-1}$)	Вид «дерева причин»	Причина аварийной ситуации
4	1572,25	Переполнение резервуара	5,0	Рис. 15	Ошибки персонала
5	978,75	Разрушение резервуара	225	Рис. 16	Некачественное проведение ремонтных работ
6	727,5	Разгерметизация железнодорожной цистерны с дизельным топливом	4,5	Рис. 13	Несанкционированные действия
7	492,5	Разрушение железнодорожной цистерны с нефтепродуктами	1,5	Рис. 12	Террористическая угроза

Номера заданий для самостоятельной работы представлены в табл. 8.

Таблица 8
Варианты заданий для самостоятельной работы

Номер варианта	Номера заданий
1	1, 5, 7
2	2, 4, 6
3	3, 4, 7
4	4, 5, 6
5	5, 6, 7
6	1, 2, 3
7	2, 3, 7
8	3, 5, 6
9	1, 4, 5
10	3, 4, 7

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение понятию «дерево событий».
2. Дайте определение понятию «дерево причин».
3. Охарактеризуйте основные этапы системного анализа аварийных ситуаций на производственных объектах.
4. Как можно рассчитать величину материального риска при развитии аварийной ситуации на производственном объекте.
5. Рассчитайте риск аварийной ситуации при разрушении железнодорожной или автоцистерны.
6. Рассчитайте риск аварийной ситуации при разгерметизации трубопровода.
7. Рассчитайте риск аварийной ситуации при переполнении резервуара.

8. Рассчитайте риск аварийной ситуации при разрушении резервуара.
9. Рассчитайте риск развития аварийной ситуации при разгерметизации железнодорожной цистерны с дизельным топливом.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №4

Системный анализ риска пожаров на объектах техносферы

Цель работы – освоение навыков системного анализа риска пожаров на техносферных объектах различного назначения с использованием локальной и интегральной теорем Лапласа.

Теоретические сведения

Риск пожаров и взрывов наиболее высок на ОПО, производственных объектах специального и военного назначения, объектах производства, переработки, хранения радиоактивных и взрывчатых веществ и материалов, объектах хранения и уничтожения взрывчатых веществ и химического оружия, наземных космических объектах и ракетных стартовых комплексах, горных выработках, лесных массивах.

Методические рекомендации к выполнению работы

Величина потенциального риска пожара на техносферном объекте $P(a)$ (год⁻¹) (далее – потенциального риска) на определенном участке (x) техносферного объекта или территории, прилегающей к нему, определяется с помощью соотношения

$$P(a) = \sum_{j=1}^n f_j P_j(x), \quad (36)$$

где j – число сценариев развития пожароопасных ситуаций (пожаров) (ветвей логического «дерева событий»); f_j – частота реализации в течение года j -го сценария развития пожароопасной ситуации, год⁻¹; $P_j(x)$ – условная вероятность возникновения пожара на определенном участке техносферного объекта (a) в результате реализации j -го сценария развития пожароопасной ситуации на техносферном объекте.

Условную вероятность поражения техносферного объекта $P_{jk}(x)$ по причине совместного независимого воздействия несколькими опасными факторами в результате реализации j -го сценария развития пожароопасных ситуаций можно оценить следующим образом:

$$P_{jk}(a) = 1 - \prod_{k=1}^h (1 - P_k P_{jk}(x)), \quad (37)$$

где h – число рассматриваемых опасных факторов; P_k – вероятность реализации k -го фактора возникновения пожара; $P_{jk}(x)$ – условная вероятность поражения k -м пожароопасным фактором.

Анализ риска пожара на основе локальной теоремы Лапласа. Если вероятность P возникновения пожара в каждом отдельном случае постоянна и

отлична от нуля и единицы, то вероятность $P_z(k)$ того, что событие A появится в n случаях ровно k раз, приближенно равна (чем больше z , тем точнее):

$$P_z(k) = \frac{1}{\sqrt{zpq}} \cdot \varphi(x), \quad (38)$$

где $x = \frac{k-zp}{\sqrt{zpq}}$; $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}$; $q = 1-p$.

Локальная теорема Лапласа предоставляет асимптотическую формулу, которая позволяет приближенно найти вероятность появления события ровно k раз в z испытаниях, если число испытаний достаточно велико. Значения функции $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}$, соответствующие положительным значениям аргумента x , указаны в прил. 1. Для отрицательных значений аргумента пользуются теми же таблицами, т. к. $\varphi(x)$ – функция четная, т. е. $\varphi(-x) = \varphi(x)$.

Пример 1. Вероятность пожара на производственном участке нефтеперерабатывающего предприятия составляет $p = 0,01$ на один технологический цикл переработки сырой нефти. Производственный участок рассчитан на $n = 650$ технологических циклов. Для переработки партии нефти-сырца необходимо осуществить $z = 10$ технологических циклов.

Найти:

а) Наиболее вероятное количество технологических циклов переработки сырой нефти, когда может возникнуть пожар.

б) Оценить вероятность возникновения пожара при реализации указанных 10 циклов.

Решение. а) Наиболее вероятное количество технологических циклов переработки сырой нефти, при которых может возникнуть пожар (k), можно определить из двойного неравенства согласно биномиальному распределению по формуле Бернулли: $np - q \leq k < np + p$, где ($q = 1 - p$).

Подставив значения n и p , получим

$$np - q \leq k < np + p, \Rightarrow 6,5 - 0,999 \leq k < 6,5 + 0,001 \Rightarrow k = 6.$$

Вероятность того, что из 385 автоцистерн, хранящихся на территории нефтебазы, которые будут подвергнуты пожару, равна k и находится по локальной теореме Лапласа.

б) Для оценки вероятности пожара при реализации 25 технологических циклов ввиду большого количества технологических циклов ($n \geq 10$) целесообразно использовать локальную теорему Лапласа: $P_z(k) = \frac{1}{\sqrt{zpq}} \cdot \varphi(x)$,

где $x = \frac{k-zp}{\sqrt{zpq}}$.

$$P(10) = \frac{1}{\sqrt{650 \cdot 0,01 \cdot 0,99}} \cdot \varphi(x), \quad \text{где} \quad \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}},$$
 теперь можно рассчитать x : $x = \frac{1 - 650 \cdot 0,01}{\sqrt{650 \cdot 0,01 \cdot 0,99}} = \frac{3,5}{2,536} = 1,38$.

Значения функции $\varphi(x)$ для вычисленного значения x находятся по специальной таблице (см. прил. 1). Для $x = 1,38$ находим $\varphi(x) = 0,1539$. А искомая вероятность

$$P_n(10) = \frac{1}{\sqrt{650 \cdot 0,01 \cdot 0,99}} \cdot 0,1539 = 0,061.$$

Ответ: $k = 6$, $P(10) = 0,061$.

Предположим, что техносферный объект включает z производственно-технологических циклов (ПТЦ), в каждом из которых вероятность возникновения пожара (событие A) одинакова и равна P ($0 < p < 1$). Как вычислить вероятность $P_n(k_1, k_2)$ того, что возникновение пожара P_A возможно при выполнении z ПТЦ (причем $k_1 \leq z \leq k_2$)? Для ответа на подобные вопросы полезно воспользоваться интегральной теоремой Лапласа.

Анализ риска пожара на основе интегральной теоремы Лапласа. Если вероятность P_A возникновения пожара при включении очередного ПТЦ постоянна¹ и отлична от нуля и единицы, то вероятность $P(z)$ возникновения пожара при включении z ПТЦ ($k_1 \leq z \leq k_2$) приближенно равна определенному интегралу:

$$P_z(k_1, k_2) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_1}^{z_2} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (39)$$

где $z_1 = (k_1 - zp) / \sqrt{zpq}$ и $z_2 = (k_2 - zp) / \sqrt{zpq}$.

При решении задач, требующих применения интегральной теоремы Лапласа, и расчетов с помощью функции $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_1}^{z_2} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$, используют специальные таблицы, т. к. неопределенный интеграл $\int e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ не выражается через элементарные функции (прил. 2). В прил. 2 приведены значения функции $\Phi(x)$ для неотрицательных значений x ; для $x < 0$ пользуются той же таблицей, т. к. $\Phi(x)$ – функция нечетная: $\Phi(-x) = -\Phi(x)$. В прил. 2 приведены значения функции лишь до $x = 5$, т. к. для $x > 5$ можно принять $\Phi(x) = 0,5$. Функцию $\Phi(x)$ часто называют функцией Лапласа.

Пример 2. После реконструкции ОПО, имеющем $n = 400$ производственно-технологических участков (ПТУ), на каждом участке было

¹ В действительности с каждым следующим ПТЦ вероятность возникновения пожара будет несколько возрастать, что обусловлено старением и износом основных фондов, оборудования, технологической оснастки производства, накоплением поломок и ошибок в системе управления промышленной безопасностью производственного объекта техносферы, а также ошибками оперативного персонала вследствие утомления.

установлено новое технологическое оборудование. Вероятность отказа нового технологического оборудования с возможным воспламенением для каждого из z участков в отдельности равна $p = 0,02$. Нужно определить вероятность того, что в диапазоне от 70 до 100 ПТУ встретится участок с возможностью воспламенения ($70 \leq z \leq 100$).

Решение. Вычислим верхний и нижний пределы интегрирования:

$$z_1 = \frac{k_1 - zp}{\sqrt{zpq}} = \frac{70 - 400 \cdot 0,2}{\sqrt{400 \cdot 0,98 \cdot 0,02}} = -3,57,$$

$$z_2 = \frac{k_2 - zp}{\sqrt{zpq}} = \frac{100 - 400 \cdot 0,2}{\sqrt{400 \cdot 0,98 \cdot 0,02}} = 7,14.$$

Согласно прил. 2:

$$P_{400}(70; 100) = \Phi(7,14) - \Phi(-3,57) = \\ = \Phi(7,14) + \Phi(3,57) = 0,4998 + 0,5 = 0,9998,$$

т. к. $\Phi(-3,57) = -\Phi(3,57)$.

Искомая вероятность $P_{400}(70; 100) = 0,4998 + 0,5 = 0,9998$.

Задания для самостоятельной работы

Часть А. Анализ риска пожара на основе локальной теоремы Лапласа.

Выполнить задания части А, используя данные из табл. 9 и формулу Бернулли: $np - q \leq k < np + p$, где ($q = 1 - p$).

Таблица 9

Данные к вариантам заданий
для самостоятельной работы (часть А)

№ п/п	p	q	n	z
1	0,01	0,99	50	10
2	0,02	0,98	65	12
3	0,03	0,97	85	15
4	0,04	0,96	100	17
5	0,05	0,95	125	20
6	0,06	0,94	150	22
7	0,07	0,93	175	25
8	0,08	0,93	200	30
9	0,09	0,91	225	35
10	0,095	0,905	250	40

Часть Б. Анализ риска пожара на основе интегральной теоремы Лапласа. Если пожар или взрыв может возникнуть при z актах производственной деятельности техносферного объекта (причем $k_1 \leq z \leq k_2$), то вероятность возникновения $P(z)$ инцидента может быть приближенно

оценена с помощью интегральной теоремы Лапласа (см. формулу (39)).
Выполнить задания части Б, используя данные из табл. 10.

Таблица 10

Данные к вариантам заданий
для самостоятельной работы (часть Б)

№ п/п	p	q	z	k_1	k_2
1	0,01	0,99	40	1	10
2	0,01	0,99	60	11	20
3	0,02	0,98	80	21	30
4	0,02	0,98	100	31	40
5	0,03	0,97	120	41	50
6	0,03	0,97	150	51	60
7	0,05	0,95	180	61	70
8	0,05	0,95	200	71	80
9	0,08	0,92	250	81	90
10	0,08	0,92	300	91	100

Варианты заданий для самостоятельной работы представлены в табл. 11.

Таблица 11

Задания для самостоятельной работы

Номер варианта	Номера заданий (часть А)	Номера заданий (часть Б)
1	1, 5, 8	2, 6, 10
2	2, 6, 9	1, 4, 8
3	3, 7, 8	3, 5, 7
4	4, 8, 10	2, 5, 9
5	5, 6, 7	4, 6, 8
6	6, 8, 9	5, 7, 9
7	7, 8, 10	1, 4, 8
8	4, 6, 8	2, 6, 10
9	3, 5, 7	4, 6, 8
10	1, 4, 10	3, 6, 9

Вопросы для самоконтроля

1. Запишите формальное выражение локальной теоремы Лапласа.
2. Как использовать локальную теорему Лапласа для системного анализа рисков?
3. Запишите формальное выражение интегральной теоремы Лапласа.
4. Как использовать интегральную теорему Лапласа для системного анализа рисков?
5. Запишите формулу Бернулли.

Лабораторная работа №5

Критерии оценки и управления техносферными рисками в условиях информационной неопределенности

Цель работы – освоение критериев оценки, а также выбора рациональной стратегии управления техносферными рисками на примере опасных факторов пожара или взрыва на опасных производственных объектах в условиях информационной неопределенности.

Теоретические сведения

Риск пожаров и взрывов наиболее высок на опасных производственных объектах (ОПО), производственных объектах специального назначения, техносферных объектах (ТО) по производству, переработке, хранению радиоактивных, химических и взрывчатых веществ и материалов, объектах хранения и уничтожения химического оружия и взрывчатых веществ, наземной космической инфраструктуры (космодромы, ракетодомы, стартовые площадки и комплексы), горных выработок, горно-обогатительных комбинатов и т. д. Управление рисками инцидентов, аварий и катастроф на объектах техносферы нередко осуществляется в условиях информационной неопределенности, которая характеризуется отсутствием конкретных сведений и четких представлений о текущем и прогнозируемом состоянии управляемых объектов и процессов, т. е. в условиях информационной неопределенности. Причем возможны различные варианты стратегий управления техносферными рисками (СУТР), рациональный выбор которых требует знания частоты событий, инициирующих пожароопасные (взрывоопасные) ситуации, включая показатели частоты инцидентов с технологическим оборудованием ОПО, приводящих к пожарам и взрывам. При этом целесообразно использовать методы принятия решений в условиях полной или частичной неопределенности – так называемые «игры с техносферой».

Методические рекомендации к выполнению работы

При управлении техносферными рисками в условиях информационной неопределенности целесообразно использовать такие критерии оптимального принятия решений, как:

- 1) критерий математического ожидания ущерба;
- 2) критерий вероятности ожидаемого ущерба техносферного риска;
- 3) максиминный критерий Вальда (пессимистичный критерий);
- 4) критерий максимакса;

- 5) критерий Гурвица;
- 6) критерий Сэвиджа (оптимистичный критерий);
- 7) критерий Лапласа.

1. Критерий математического ожидания ущерба от инцидента на ТО. Исходные данные для расчета обычно представляются в виде табл. 12, где x_{ij} обозначает результат, который можно получить от i -го решения при j -м состоянии ТО.

Таблица 12

Исходные данные для расчета математического ожидания ущерба при инциденте на техносферном объекте (ТО)

Выбор варианта управления рисками при различных состояниях ТО	Состояние ТО (S) и его вероятность (P)		
	$S_1 (P_1)$	$S_2 (P_2)$	$S_i (P_i)$
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{1j}
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{2j}
A_i	x_{i1}	x_{i2}	x_{ij}

Критерий математического ожидания определяется по формуле

$$K = \max M(x_i), \quad (40)$$

где (x_i) – математическое ожидание результата для i -й строки.

Математическое ожидание рассчитывается по формуле

$$M(x_j) = \sum_{i=1}^n x_j \cdot P_i,$$

где p_j – вероятность j -го состояния среды.

Оптимальным считается то решение, которому соответствует наибольший результат. Если все состояния среды имеют равную вероятность, то для расчетов используется критерий Лапласа:

$$K = \max \sum_{j=1}^n x_{ij}. \quad (41)$$

2. Критерий оценки вероятности ожидаемого ущерба основан на том, что степень риска (R) определяется как произведение ожидаемого ущерба на вероятность того, что этот ущерб произойдет. Наилучшим является решение с минимальным значением рассчитанного показателя.

Математически суть этого метода можно выразить в виде формулы

$$R = A \cdot p_1 + (A + B) \cdot p_2, \quad (42)$$

где A и B – ущерб при принятии различных решений; p_1 и p_2 – степень вероятности получения ущерба.

3. Максиминный критерий Вальда (пессимистичный критерий). В качестве оптимальной выбирается стратегия, максимизирующая наш выигрыш

в самой неблагоприятной ситуации. Математически критерий записывается так: $\max_i \min_j a_{ij}$.

4. Критерий максимакса по своему смыслу является противоположным предыдущему критерию: $\max_i \min_j a_{ij}$. Он предполагает рассмотрение наиболее благоприятной (оптимальной) стратегии управления рисками, обеспечивающей наибольшие преимущества по сравнению с другими. Математически критерий записывается так: $\max_i \max_j a_{ij}$.

5. Критерий Гурвица придерживается промежуточной, взвешенной позиции, учитывающей как возможность наихудшего, так и возможность наилучшего состояния ГО:

$$G = \max_i (\alpha \min_j a_{ij} + (1 - \alpha) \max_j a_{ij}), \quad (43)$$

где $\max x_{ij}$ – лучший результат; $\min x_{ij}$ – худший результат; α – параметр оптимизма ($0 \leq \alpha \leq 1$).

Следует отметить, что при $\alpha = 1$ критерий превращается в критерий Вальда, при $\alpha = 0$ – в критерий максимакса. Выбор конкретного значения α определяется субъективными факторами, например, склонностью к риску лица, принимающего решение (ЛПР), по управлению техносферными рисками. Величина параметра α принимается равной от 0 до 1 в зависимости от оценки ситуации ЛПР: при оптимистическом подходе значение α принимается больше 0,5, при пессимистическом – меньше 0,5. Если $\alpha = 1$, критерий Гурвица называется максимакс, или критерий азартного игрока. При $\alpha = 0$ он называется максимин, или «критерий пессимиста».

6. Критерий Сэвиджа (оптимистичный критерий) предполагает рассмотрение дополнительной матрицы (*матрицы рисков*), смысл которой в том, что каждая стратегия управления техносферными рисками основана на оценке разности величин наибольшего (максимального) ущерба и всех остальных возможных ущербов при реализации СУТР. Математически критерий записывается как

$$\min_i \max_j r_{ij} . \quad (44)$$

Элементами *матрицы рисков* являются разности между величиной ущерба, который обусловлен реализацией конкретной стратегии управления риском: $r_{ij} = \beta_j - \alpha_{ij}$, где $\beta_j = \max_j a_{ij}$, как показано в табл. 13.

7. Критерий Лапласа. Этот критерий исходит из следующего соображения. Поскольку нам ничего не известно о принципах или вероятностях применения вторым игроком своих стратегий, мы предполагаем эти вероятности равными друг другу, т. е. $\frac{1}{n}$. Математически критерий

записывается так: $\max_j \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \right]$. Таким образом, смысл критерия – максимизация ожидаемой выгоды от эксплуатации ТО в предположении равновероятного развития аварийных событий, сопряженных с причинением материального ущерба.

Пример 1. В табл. 13 представлена матрица рисков (в условных единицах), основанная на оценке предполагаемых потерь при реализации различных СУТР при различных режимах эксплуатации (РЭ) ТО. Необходимо найти оптимальный вариант СУТР.

Таблица 13

Матрица рисков, основанная на оценке предполагаемых ущербов при реализации различных СУТР при различных режимах эксплуатации ТО, усл. ед.

Стратегии управления рисками при эксплуатации ТО	№ п/п	Общая характеристика СУР	Режим эксплуатации ТО			
			РЭ-1	РЭ-2	РЭ-3	РЭ-4
	СУТР-1	Соблюдение стандартных процедур производственной безопасности	4	1	7	4
	СУТР-2	Обеспечение надежности многочисленных и дешевых компонентов	5	4	3	7
	СУТР-3	Обеспечение надежности малочисленных и дорогостоящих компонентов	2	5	2	3
	СУТР-4	Обеспечение надежности всех компонентов	1	3	10	5

Решение. В условиях частичной информационной неопределенности могут быть известны величины предполагаемых ущербов, обусловленных различными режимами эксплуатации ТО. Чтобы найти оптимальные варианты СУТР при выборе их ЛПР, целесообразно использовать критерии принятия решений, в частности максиминный критерий Вальда (пессимистичный критерий), а также критерии максимакса, Гурвица, Сэвиджа (оптимистичный критерий), а также критерий Лапласа.

Максиминный критерий Вальда: $\max_i \min_j a_{ij} = \max_i (2, 1, 2, 3) = 3$, следовательно, при выборе СУР рекомендуется исключить вторую стратегию, т. к. значение 3 – в третьей строке матрицы рисков.

Критерий максимакса: $\min_i \max_j a_{ij} = \max_j (7, 7, 8, 10) = 10$, таким образом, при принятии решения по управлению рисками целесообразно

исключить из рассмотрения четвертую стратегию, т. к. значение 10 – в четвертой строке табл. 13.

Критерий Гурвица:

$$\begin{aligned} \max_i (\alpha \min_j a_{ij} + (1-\alpha) \max_j a_{ij}) &= \max_i \left(\frac{1}{2} (1,3,2,1) + \frac{1}{2} (7,7,8,10) \right) = \\ &= \max_i \left(4,5,5, \frac{11}{2} \right) = \frac{11}{2}. \end{aligned}$$

Таким образом, наибольший ущерб предполагается в случае реализации четвертой стратегии, поскольку значение $\frac{11}{2}$ находится на четвертой позиции.

Критерий Сэвиджа: элемент определяется как максимум в каждом столбце, после чего из β для каждого столбца вычитаются элементы этого столбца. В этом случае матрица рисков имеет вид

$$r_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 3 & 3 \\ 0 & 4 & 7 & 0 \\ 3 & 0 & 8 & 4 \\ 4 & 5 & 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

Тогда $\min_i \max_j r_{ij} = \min_i (4,6,8,4) = 4$, следовательно, как наиболее эффективная СУТР может быть выбрана либо первая, либо четвертая стратегия.

Критерий Лапласа:

$$\max_i \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \right] = \max_i \begin{pmatrix} \frac{1}{4} (4 & 1 & 7 & 4) \\ \frac{1}{4} (5 & 4 & 3 & 7) \\ \frac{1}{4} (2 & 5 & 2 & 3) \\ \frac{1}{4} (1 & 3 & 10 & 5) \end{pmatrix}.$$

Ответ. При выборе целесообразно исключить вторую и четвертую СУТР, а также, очевидно, предпочесть третью стратегию, т. к. значение $\frac{15}{4}$ соответствует третьей строке матрицы рисков.

Пример 2. Производственно-технологическая линия (ПТЛ) промышленного предприятия может функционировать в двух режимах эксплуатации «А» и «В», каждый из которых характеризуется затратами на обеспечение производственной безопасности (ПБ) линии и уровнем ущерба от выхода данной ПТЛ из строя. В частности, для режима эксплуатации «А» затраты на обеспечение ПБ и ожидаемый ущерб составляют 52 и 20 усл. ед., а для режима «В» – 20 и 47 усл. ед. Требуется найти оптимальное соотношение между использованием режимов эксплуатации «А» и «В» ПТЛ, когда предприятию гарантируется средний уровень от затрат на ПБ и возможного ущерба от выхода данной линии из строя.

Решение. Рассмотрим данную ситуацию как игру «промышленное предприятие против техносферных рисков». Построим матрицу возможных ущербов: $\begin{pmatrix} 52 & 21 \\ 20 & 47 \end{pmatrix}$. Определим уровень наибольшего ущерба из минимально возможных его значений:

$$u^0 = \max_i \min_j a_{ij} = \max(20, 21) = 21,$$

$$v^0 = \min_j \max_i a_{ij} = \min(52, 47) = 47.$$

Очевидно, что верхний и нижний уровни ущербов не совпадают. Это означает, что игра неразрешима в чистых стратегиях. При этом можно выбрать стратегии эксплуатации ПТЛ в режиме «А» или «В», либо в некотором их соотношении.

Представляется целесообразным следующее решение:

$$52p_1 + 21(1-p_1) = 21 + 31p_1 = v;$$

$$20p_1 + 47(1-p_1) = 47 - 27p_1 = v;$$

$$\begin{cases} 52p_1 + 21(1-p_1) = 21 + 31p_1 = v, \\ 20p_1 + 47(1-p_1) = 47 - 27p_1 = v; \end{cases} \begin{cases} 61p_1 - 26 = 0, \\ 47 - 27p_1 = v; \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_1 = \frac{26}{61}, \\ v = 47 - \frac{27 \cdot 26}{61} = 35,49; \end{cases}$$

$$p_2 = 1 - p_1 = \frac{35}{61}.$$

Ответ. Промышленное предприятие принимает стратегии выбора режимов эксплуатации ПТЛ с вероятностями $\frac{26}{61}$ и $\frac{35}{61}$. Минимизация ущербов возможна на основе совместного использования режимов «А» и «В» в соотношении $\frac{26}{35} \approx \frac{5}{7}$.

Пример 3. На промышленном предприятии внедрен инновационный производственный участок (ИПУ). Возможный ущерб в случае аварийной ситуации на этом участке не поддается точной оценке. Однако можно предположить, что величина предполагаемого ущерба характеризуется тремя режимами эксплуатации. Каждый из них обуславливает три возможные стратегии управления рисками производственной деятельности (СУР ПД). Каждая из СУР ПД характеризуется определенными экономическими затратами. Показатели затрат для каждой из возможных стратегий управления рисками при трех состояниях экономического ущерба для предприятия при условии реализации потенциальных инцидентов характеризуются матрицей

$\begin{pmatrix} 22 & 24 & 21 \\ 21 & 23 & 24 \\ 21 & 21 & 27 \end{pmatrix}$. Причем в столбцах указаны данные ущерба при трех различных инцидентах, а в строках в первом, втором и третьем вариантах СУТР сверху вниз. Требуется определить СУР ПД, обеспечивающую средний ущерб в случае аварийного инцидента на ИПУ.

Решение. Рассмотрим данную проблемную ситуацию управления рисками производственной деятельности как игру. Определим седловую точку, если она существует:

$$u^0 = \max_i \min_j a_{ij} = \max(22, 21, 21) = 21,$$

$$v^0 = \min_j \max_i a_{ij} = \min(21, 24, 27) = 21.$$

Верхняя и нижняя границы ущерба совпадают, т. е. седловая точка существует и проблемная ситуация разрешима в чистых стратегиях.

Ответ. Следовательно, промышленному предприятию целесообразно использовать первую СУР ПД. Поскольку второй «игрок» в этой игре – техноферные риски производственной деятельности, то определение для них оптимальной стратегии не имеет смысла.

Задания для самостоятельной работы

1. Найти оптимальный вариант СУР аварии при эксплуатации ТО на основе матрицы рисков аварийных ситуаций (в условных единицах), представленной в табл. 14.

Таблица 14

Матрица рисков аварийных ситуаций, усл. ед.

Стратегии управления рисками при эксплуатации ТО	№ п/п	Режим эксплуатации ОПО		
		РЭ-1	РЭ-2	РЭ-3
СУТР-1		3	8	1
СУТР-2		3	2	5
СУТР-3		5	4	7

2. Найти оптимальный вариант СУР аварии при эксплуатации ТО на основе матрицы рисков (в условных единицах), представленной в табл. 15.

Таблица 15

Матрица рисков, усл. ед.

Стратегии управления рисками при эксплуатации ТО	№ п/п	Режим эксплуатации ОПО			
		РЭ-1	РЭ-2	РЭ-3	РЭ-4
	СУТР-1	7	1	3	5
СУТР-2	6	2	8	4	
СУТР-3	3	2	5	1	
СУТР-4	2	1	4	2	

3. Ущерб при реализации каждого из трех возможных вариантов СУР аварии для трех различных вариантов инцидентов на производственно-технологической линии (ПТЛ) СУР характеризуются матрицей $\begin{pmatrix} 18 & 32 & 42 \\ 22 & 20 & 33 \\ 29 & 25 & 28 \end{pmatrix}$. Требуется определить СУР ПД для минимизации ущерба при возникновении инцидентов на ПТЛ ТО.

4. Ущерб при реализации каждого из трех возможных вариантов СУР аварии для трех различных ситуаций, сопровождающихся авариями при эксплуатации ОПО, характеризуются матрицей $\begin{pmatrix} 11 & 12 & 22 \\ 20 & 17 & 12 \\ 19 & 15 & 20 \end{pmatrix}$. Требуется определить СУР ПД для среднедопустимого ущерба при возникновении инцидентов на ОПО.

5. Промышленное предприятие производит взрывоопасные энергетические системы (ВЭС), которые до реализации потребителям находятся на хранении в специальном подземном хранилище (СПХ) на предприятии. При этом возможны три сценария развития чрезвычайных ситуаций на СПХ, риски развития которых с учетом СУТР представлены в табл. 16.

Таблица 16

Риски сценариев развития чрезвычайных ситуаций на СПХ
с учетом СУТР при ВЭС в СПХ

Сценарии развития аварии на ОПО	СУПБ при хранении ВЭС в СПХ		
	I	II	III
1	7	12	17
2	15	10	5
3	12	9	6

Примечание. Требуется определить наименее рациональную СУПБ при хранении ВЭС в СПХ.

Варианты заданий для самостоятельной работы представлены в табл. 17.

Таблица 17
Задания для самостоятельной работы
по вариантам

Номер варианта	Номера заданий
1	1, 3, 5
2	2, 3, 5
3	1, 2, 4
4	2, 3, 5
5	3, 4, 5
6	1, 2, 4

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите критерии принятия решений по управлению техносферными рисками в условиях информационной неопределенности.
2. Охарактеризуйте смысл критерия математического ожидания ущерба.
3. Охарактеризуйте смысл критерия вероятности ожидаемого ущерба техносферного риска.
4. Охарактеризуйте смысл максиминного критерия Вальда (пессимистичного критерия).
5. Напишите формулу максиминного критерия Вальда.
6. Охарактеризуйте смысл критерия максимакса.
7. Напишите формулу критерия максимакса.
8. Охарактеризуйте смысл критерия Гурвица.
9. Напишите формулу критерия Гурвица.
10. Охарактеризуйте смысл критерия Сэвиджа (оптимистичный критерий).
11. Напишите формулу критерия Сэвиджа.
12. Охарактеризуйте критерий Лапласа.
13. Напишите формулу критерия Лапласа.

Лабораторная работа №6

Логико-вероятностный анализ надежности систем электроснабжения

Цель работы – освоение навыков логико-вероятностного анализа надежности функционирования систем электроснабжения техносферных объектов.

Теоретические сведения

Система электроснабжения (СЭС) производственных объектов является совокупностью взаимосвязанных электроустановок, осуществляющих электроснабжение района, города, предприятия, и неотъемлемой частью энергосистемы техносферного объекта. Надежность СЭС – это способность энергосистемы обеспечивать бесперебойность энергоснабжения потребителей и поддержание в допустимых пределах показателей качества электрической энергии.

Методические рекомендации к выполнению работы

Наибольшее распространение в инженерной практике получили численно-аналитические методы исследования СЭС и ее режимов, такие, как:

- 1) логико-вероятностный метод, при котором используется аппарат методов минимальных путей и сечений;
- 2) метод пространств состояний на основе марковских процессов.

Метод минимальных путей и сечений. На рис. 17 представлена мостиковая схема СЭС, а на рис. 18 представлены минимальные пути и минимальные сечения для этой мостиковой схемы.

Минимальный путь – это минимальный набор элементов, который обеспечивает нормальное функционирование схемы от источника питания до узла нагрузки.

Минимальное сечение – это отказ того минимального набора элементов, который в любом из наборов приводит к отказу системы относительно рассматриваемого узла. При этом предполагается неограниченная пропускная способность элементов схемы относительно каждого рассматриваемого

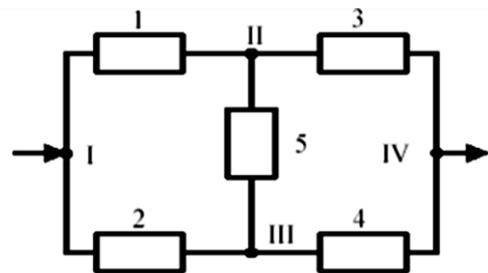


Рис. 17. Мостиковая схема СЭС

узла нагрузки. Для мостиковой схемы (рис. 17), минимальными путями относительно узла 4 будут: {1, 3}; {2, 4}; {1, 5, 4}; {2, 5, 3}, а минимальными сечениями – {1, 2}; {3, 4}; {1, 5, 4}; {2, 5, 3}. Для определения вероятности

безотказной работы схемы относительно некоторого узла n используется формула

$$P_C = P(\sum_{i=1}^k E_i) = \sum_{i=1}^k P(E_i) - \sum_{i,j} P(E_i, E_j) + \sum_{i,j,l} P(E_i, E_j, E_l) - \dots + (-1)^{k-1} P(E_1 E_2 \dots E_k), \quad (45)$$

где k – число путей; Π_i – событие работы i -го пути; $P(\Pi_i)$ – вероятность безотказной работы i -го пути

$$P(E_i) = \prod_{j=1}^{m_i} P(E)_{i,j}, \quad (46)$$

где $P_{i,j}$ – вероятность безотказной работы j -го элемента в i -м пути; m_i – число элементов в i -м пути. Причем вероятность безотказной работы этого пути

$$P(E_1 E_2 \dots E_k) = P(E_1) P(E_2/E_1) \dots P(E_k/E_1 E_2 \dots E_{k-1}), \quad (47)$$

где $P(E_1 E_2 \dots E_k)$ – вероятность безотказной работы k путей; $P(E_k/E_1 E_2 \dots E_{k-1})$ – условная вероятность безотказной работы k путей; $P(\Pi_1)$ – вероятность безотказной работы первого пути.

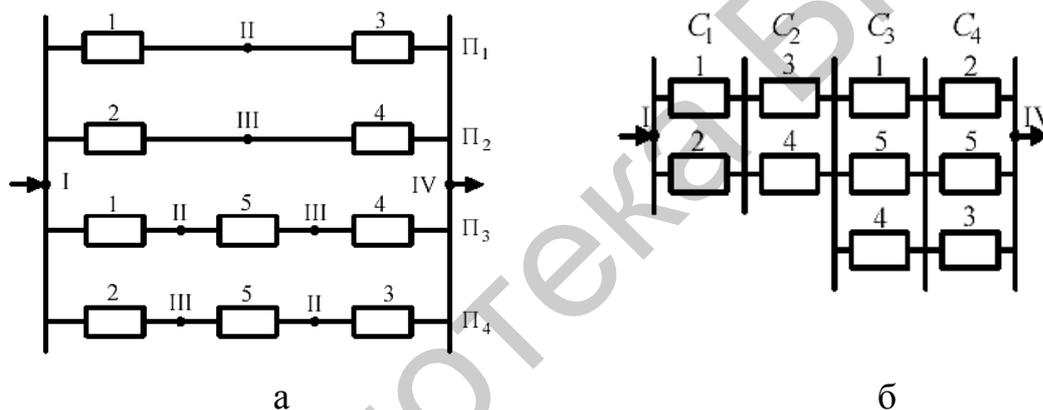


Рис. 18. Минимальные пути (а) и минимальные сечения (б) для мостиковой схемы СЭС

Правило метода минимального пути. При определении каждой последующей условной вероятности следует учитывать вероятность безотказной работы тех элементов, которые еще не входили в предыдущие пути. Вероятность безотказной работы элементов, входивших в предыдущие пути, будет равна единице.

При определении вероятности отказа схемы относительно узла нагрузки, когда она заменяется эквивалентной параллельно-последовательной (минимальные сечения), также используется формула суммы вероятностей совместимых событий – отказов сечений. Вероятность отказа схемы относительно некоторого узла нагрузки

$$Q_C = Q\left(\sum_{i=1}^k C_i\right) =$$

$$= \sum_{i=1}^k Q(C_i) - \sum_{i=1}^k Q(C_i C_j) + \sum_{i=1}^k Q(C_i C_j C_l) - \dots (-1)^{k-1} Q(C_1 C_2 \dots C_k),$$

где C_i – событие отказа i -го сечения; k – количество сечений; $Q(C_i)$ – вероятность отказа i -го сечения

$$Q(C_i) = \prod_{j=1}^{m_i} q_{i,j}. \quad (48)$$

Здесь $q_{i,j}$ – вероятность отказа j -го элемента i -го сечения; m_i – число элементов в i -м сечении. Причем вероятность отказа i -го сечения

$$Q(C_1 C_2 \dots C_k) = Q(C_1) Q(C_2/C_1) \dots Q\left(\frac{C_k}{C_1 C_2 \dots C_{k-1}}\right),$$

где $Q(C_1 C_2 \dots C_k)$ – вероятность отказа k сечений; $Q\left(\frac{C_2}{C_1}\right)$ – условная вероятность отказа второго сечения при отказе первого сечения.

Правило метода минимального сечения. При определении каждой последующей условной вероятности следует учитывать вероятность отказа только тех элементов, которые еще не входили в предыдущие сечения. Вероятность отказа элементов, входивших в предыдущие сечения, равна единице.

Например, вероятность отказа сечений C_1 и C_3 будет равна

$$Q(C_1 C_2 \dots C_k) = \prod_{i=1}^r q_i, \quad (49)$$

где r – число элементов, входящих в k сечений, т. е. эта вероятность равна произведению вероятностей отказов всех элементов, входящих в эти сечения, причем каждый элемент учитывается в произведении только один раз.

Марковские случайные процессы. Наиболее часто для описания и прогнозирования смены состояний СЭС, состоящей из отдельных элементов, используется модель марковского случайного процесса, который играет важную роль для решения задач прогнозирования характеристик надежности СЭС. Марковский процесс – это процесс, у которого для каждого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от ее состояния в данный момент, но не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние. В качестве показателей используются следующие параметры: $\lambda(t)$ – интенсивность отказов; $\mu(t)$ – интенсивность восстановления; $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $Q(t)$ – вероятность отказа; $K_r(t)$ – коэффициент готовности; $K_n(t)$ – коэффициент вынужденного простоя системы. Например, нерезервированная система может находиться в произвольный момент времени t в одном из двух состояний: 0 – система работоспособна; 1 – система неработоспособна и находится в ремонте.

Математическая модель представляется в виде графа состояний, где квадратами изображают возможные состояния системы при отказах ее элементов, а стрелками – возможные направления переходов системы из одного состояния в другое. Около стрелок указывается интенсивность переходов (например, λ , μ). Расчетная схема надежности восстанавливаемой одноэлементной системы представлена на рис. 19.

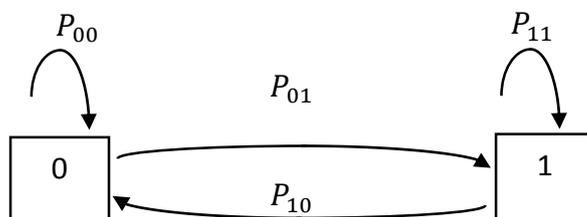


Рис. 19. Расчетная схема одноэлементной системы

Эта система с интенсивностью λ стремится принять состояние отказа, с интенсивностью μ – перейти в работоспособное состояние. Обозначим устойчивые состояния системы индексами: 1 – отказ, когда система находится в состоянии восстановления с параметром интенсивности $\mu = \text{const}$; 0 – работоспособное состояние с параметром потока отказа $\lambda = \text{const}$.

Граф переходов может быть представлен либо матрицей переходов, либо системой уравнений. Запишем переходные вероятности P_{ij} в виде прямоугольной таблицы (матрицы):

$$\|P_{ij}\| = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nj} & \dots & P_{nn} \end{vmatrix}. \quad (50)$$

Графу перехода состояний соответствует матрица переходных вероятностей 2×2 : $\|P_{ij}(\Delta t)\|$.

Диагональные элементы этой матрицы определяются как вероятность безотказной работы на отрезке Δt :

$$P_{00}(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t}$$

и вероятность продолжения восстановления системы на отрезке Δt :

$$P_{11}(\Delta t) = e^{-\mu \Delta t}.$$

Воспользуемся формулой разложения функции в ряд:

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \frac{x^k}{k!}. \quad (51)$$

В высоконадежных элементах $\lambda < 10^{-5}$ 1/ч, поэтому при разложении в ряд функции $P_{00}(\Delta t)$, сохраняя высокую точность расчета можно ограничиться только двумя первыми членами ряда. Пусть $\lambda = 10^{-4}$ 1/ч, $\Delta t = 1$ ч, тогда

$$e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \lambda \Delta t + \frac{(\lambda \Delta t)^2}{2} - \frac{(\lambda \Delta t)^3}{6} + \dots + 0(\Delta t) \rightarrow 0.$$

Для практических расчетов надежности на основе графа состояний системы можно составить математическую модель с помощью **общего правила Колмогорова для составления дифференциальных уравнений**: в левой части уравнения записывается производная вероятности i -го состояния, а в правой части – столько членов, сколько стрелок связано с данным состоянием. Если стрелка направлена в данное состояние, то ставится плюс, если из данного состояния – минус. Каждый член равен интенсивности соответствующего потока событий (λ или μ), переводящего систему по данной стрелке, умноженной на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка.

Используя данное правило, можно получить систему дифференциальных уравнений для одноэлементной системы:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(\Delta t)}{dt} = -\lambda \cdot P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1(\Delta t)}{dt} = -\lambda \cdot P_0(t) - \mu P_1(t). \end{cases} \quad (52)$$

Для стационарного процесса, когда происходит восстановление объекта, вероятности $P_0(t)$ и $P_1(t)$ становятся постоянными величинами, а их первые производные – равными нулю. От системы дифференциальных уравнений можно перейти к системе алгебраических уравнений, учитывая что $P_0 + P_1 = 1$:

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0; \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases} \quad (53)$$

Если обозначить вероятности этих состояний через $P_0(t)$ и $P_1(t)$, то $K_r(t) = P_0(t)$ и $K_n(t) = P_1(t)$. При длительной эксплуатации ($t \rightarrow \infty$) могут быть достигнуты установившиеся значения коэффициента готовности ($K_r = P_0$) и коэффициента простоя ($K_n = P_1$). Так как $\mu = \frac{1}{T_B}$; $\lambda = \frac{1}{T}$, где T_B – среднее время восстановления; T – среднее время между отказами:

$$K_n(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} (e^{-0 \cdot t} - e^{-(\mu + \lambda)t}) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} (1 - e^{-(\mu + \lambda)t}). \quad (54)$$

Если при $t = 0$ система находилась в неработоспособном состоянии, то $P_0(t)$ и $P_1(t)$ будут результатом решения системы:

$$\begin{cases} K_r(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t}; \\ K_n(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} (1 + e^{-(\mu + \lambda)t}). \end{cases} \quad (55)$$

При длительной эксплуатации получим стационарные значения коэффициентов готовности и простоя, не зависящие от начальных условий:

$$K_{\Gamma}(t) = P_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}; \quad K_{\Pi}(t) = P_1 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}. \quad (56)$$

Здесь коэффициент готовности K_{Γ} характеризует долю времени, в течение которого система работоспособна, а коэффициент простоя K_{Π} – долю времени, в течение которого она восстанавливается (ремонтируется).

Пример решения задачи

На рис. 20 представлена схема СЭС ТО, состоящая из двух параллельно работающих элементов и способная находиться в состояниях 0, 1 и 2.

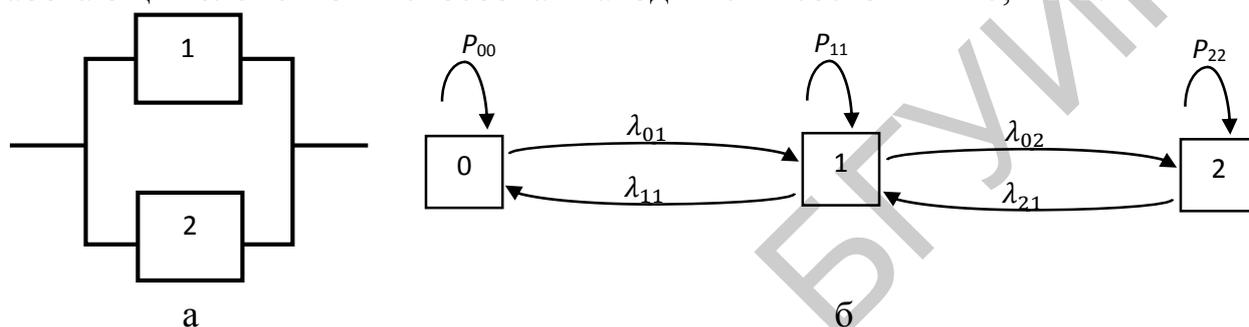


Рис. 20. Схема резервированного ТО (а) и граф его состояний (б)

Состояния системы:

- 0 – оба элемента, входящие в систему, работоспособны;
- 1 – один из элементов находится в неработоспособном состоянии;
- 2 – оба элемента находятся в отказе.

Из i -го состояния в j -е объект переходит с постоянной интенсивностью λ_{ij} , обратно – с постоянной интенсивностью μ_{ji} .

Решение. Составим уравнения для определения вероятностей каждого из состояний марковского процесса в рассматриваемом объекте (дифференциальные уравнения А. Н. Колмогорова):

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda_{01}P_0(t) + \mu_{10}P_1(t), \\ \frac{dP_1}{dt} = -(\lambda_{12} + \mu_{10})P_1(t) + \mu_{21}P_2(t), \\ \frac{dP_2}{dt} = -\mu_{21}P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t). \end{cases} \quad (57)$$

Решение системы можно получить по известным правилам решения системы дифференциальных уравнений. Однако его можно существенно упростить, если учесть, что рассматривается стационарный марковский процесс, для которого $dP_i(t) = 0$ (вероятности состояний не меняются с течением времени). Тогда

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_{01}P_0 + \mu_{10}P_1, \\ 0 = \lambda_{01}P_0 - (\lambda_{12} + \mu_{10})P_1(t) + \mu_{21}P_2(t), \\ 0 = -\mu_{21}P_2 + \lambda_{12}P_1, \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1, \end{cases} \quad (58)$$

где последнее уравнение $\sum_{i=0}^2 P_i = 1$ называется нормировочным условием, которое обусловлено тем, что первые три уравнения сводятся к двум (при трех неизвестных).

Ответ. Решив систему линейных алгебраических уравнений (например, методом Гаусса), можно найти вероятности состояний СЭС:

$$P_1 = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \cdot P_0; \quad P_2 = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{\mu_{21}} \cdot P_0; \quad 1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \left(1 + \frac{\lambda_{12}}{\mu_{21}}\right) = 0.$$

Задания для самостоятельной работы

1. Техническое устройство S состоит из двух узлов 1 и 2, каждый из которых может в ходе работы устройства выйти из строя. Возможны следующие состояния системы: S_1 – оба узла работают; S_2 – первый узел отказал, второй работает; S_3 – второй узел отказал, первый работает; S_4 – оба узла вышли из строя. Построить граф состояний.

2. Найти вероятность безотказной работы СЭС производственного объекта (ПО), элементы которой соединены по схеме, представленной на рис. 21, если вероятность безотказной работы каждого элемента равна 0,9.

3. На рис. 22 представлена структурная схема СЭС ПО, где $\lambda_1 = 0,5 \cdot 10^{-4}$; $\lambda_2 = 0,8 \cdot 10^{-4}$; $\lambda_3 = 0,3 \cdot 10^{-4}$; $\lambda_4 = 10^{-3}$. Определить вероятность безотказной работы, используя метод минимальных путей и сечений.

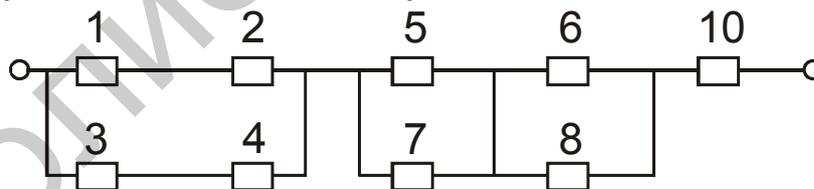


Рис. 21. Структурная схема надежности СЭС ПО

4. Для условий задачи 2 построить зависимость работоспособности от состояний СЭС, если отказ первого элемента приводит к снижению работоспособности на 10 %, второго – на 20 %, третьего – на 30 %. Отказ первого и второго – на 40 %, первого и третьего – на 50 %, второго и третьего – на 60 %.

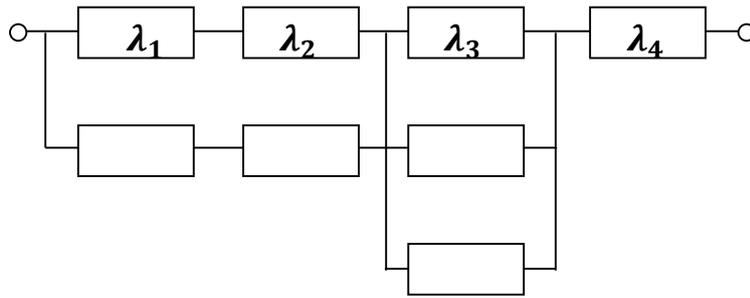


Рис. 22. Структурная схема СЭС ПО

5. Система СЭС ОПО, которая может находиться в одном из пяти возможных состояний: S_1 – исправна, работает; S_2 – неисправна, ожидает осмотра; S_3 – осматривается; S_4 – ремонтируется; S_5 – списана, не работает. Написать дифференциальные уравнения для предельных вероятностей состояний, графов, представленных на рис. 23.

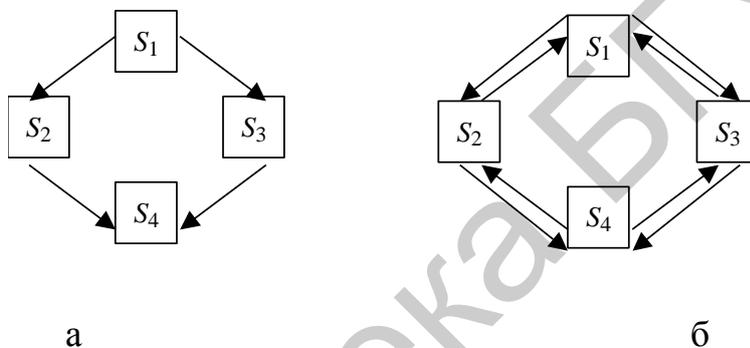


Рис. 23. Граф состояний СЭС ПО

6. Происходит три аварии СЭС на ПО, который может быть в тех же четырех состояниях S_1, S_2, S_3, S_4 , но вероятности перехода для трех последовательных выстрелов различны и заданы тремя матрицами:

$$\|P_{ij}^{(1)}\| = \begin{vmatrix} 0,3 & 0,4 & 0,2 & 0,1 \\ 0 & 0,4 & 0,4 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0,3 & 0,7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad \|P_{ij}^{(2)}\| = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,4 & 0,3 & 0,2 \\ 0 & 0,2 & 0,5 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad \|P_{ij}^{(3)}\| = \begin{vmatrix} 0,05 & 0,3 & 0,4 & 0,25 \\ 0 & 0,1 & 0,6 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

7. Написать алгебраические уравнения для предельных вероятностей состояний СЭС ПО S , граф состояний которой представлен на рис. 24. Решить эти уравнения.

Записать выражения для расчета:

1) вероятности безотказной работы и вероятности отказа;

2) средней наработки на отказ.

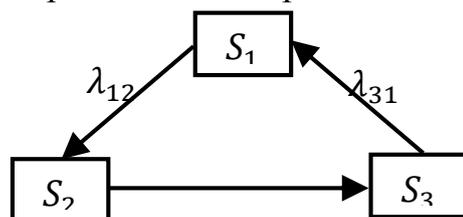


Рис. 24. Граф состояний

Вычислить характеристики СЭС при $\lambda_{12} = 0,4 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, $\lambda_{23} = 1,5 \cdot 10^{-2}$ 1/ч; $\lambda_{31} = 2,2 \cdot 10^{-3}$ 1/ч и $\Delta t = 100$ ч. В начальный момент цель находится в состоянии S_1 . Найти вероятности состояний СЭС после трех аварий и показать граф переходов.

8. Система СЭС ПО состоит из трех блоков. Нарботка на отказ блоков составляет 1100, 960, 980 ч, а среднее время восстановления блоков 50, 40, 42 ч. Предполагая отказы блоков независимыми и закон распределения времени отказов экспоненциальным, определить вероятность безотказной работы СЭС ОПО за период времени 100 ч.

Варианты заданий для самостоятельной работы представлены в табл. 18.

Таблица 18

Номера заданий для самостоятельной работы

Номера варианта	Номер задания
1	1, 6, 8
2	2, 5, 7
3	3, 5, 6
4	4, 7, 8
5	5, 6, 7
6	1, 2, 3
7	2, 6, 8
8	3, 4, 7
9	4, 5, 6
10	1, 2, 6

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите наиболее распространенные методы анализа надежности систем электроснабжения.
2. Охарактеризуйте логико-вероятностный метод для анализа надежности систем электроснабжения.
3. Охарактеризуйте метод минимальных путей и сечений.
4. Что такое минимальный путь?
5. Что такое минимальное сечение?
6. Дайте определение марковскому процессу.
7. Что представляет собой граф переходов и состояний?
8. Что позволяет определить метод, основанный на использовании марковских процессов, и какие допущения он предполагает?
9. Охарактеризуйте вероятность перехода из одного состояния в другое в условиях марковского процесса.
10. По какому правилу можно составить систему дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова?

Лабораторная работа №7

Анализ вероятности разрушений зданий и сооружений при авариях на объектах техносферы

Цель работы – освоение навыков анализа вероятности разрушений зданий и сооружений при авариях на объектах техносферы.

Теоретические сведения

При оценке последствий воздействия опасных факторов аварий на ОПО и для оценки степени возможного разрушения зданий и сооружений по вычисленным параметрам поражающих факторов могут быть использованы детерминированные и вероятностные критерии. **Детерминированные критерии** устанавливают значения показателей поражающего фактора, при которых наблюдается тот или иной уровень поражения (разрушения). Если значение поражающего фактора превышает предельно допустимый уровень (ПДУ) воздействия, то условная вероятность поражения принимается равной 1; если интенсивность воздействия не достигает ПДУ, то равной 0. **Вероятностные критерии** показывают, какова условная вероятность разрушения ($P_{\text{разр}}$) при заданном значении поражающего фактора, которая выражается функцией Гаусса через пробит-функцию:

$$P_{\text{разр}} = f[\text{Pr}(D)]. \quad (60)$$

Связь вероятности поражения и разрушения объектов техносферы с пробит-функцией приведена в табл. 19.

Таблица 19

Связь вероятности разрушения зданий и сооружений с пробит-функцией

$p, \%$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	–	2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

В общем случае пробит-функция имеет вид

$$\text{Pr} = a + b \cdot \ln D; \quad (61)$$

где a и b – константы, зависящие от вида и параметров негативного воздействия; D – доза негативного воздействия (при тепловом воздействии – функция плотности интенсивности теплового излучения и времени воздействия; при барическом воздействии – избыточное давление на фронте ударной волны и импульс фазы сжатия; при токсическом воздействии – концентрация токсического вещества и время воздействия).

Методические рекомендации к выполнению работы

Детерминированные критерии поражения. Величина избыточного давления на фронте ударной волны $\Delta P_{\phi} = 5$ кПа принимается безопасной для человека. Воздействие на человека ударной волной с избыточным давлением на фронте $\Delta P_{\phi} > 120$ кПа рекомендуется принимать в качестве смертельного поражения. Общие критерии повреждения зданий приведены в табл. 20.

Таблица 20

Критерии разрушения промышленных зданий от избыточного давления

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Полное разрушение зданий	Более 100
Тяжелые повреждения, здание подлежит сносу	70
Средние повреждения зданий, возможно восстановление здания	28
Разрушение оконных проемов, легкосбрасываемых конструкций	14
Частичное разрушение остекления	Менее 2

Степени разрушения различных административных, производственных зданий и сооружений от воздействия избыточного давления ударной волной приведены в табл. 21.

Таблица 21

Данные о степени разрушения производственных, административных зданий и сооружений, имеющих разную устойчивость

Тип зданий, сооружений	Степень разрушения при избыточном давлении на фронте ударной волны, кПа			
	Слабая	Средняя	Сильная	Полная
Промышленные здания с тяжелым металлическим (железобетонным) каркасом	20 – 30	30 – 40	40 – 50	>50
Промышленные здания с легким каркасом и бескаркасной конструкции	10 – 20	25 – 35	35 – 45	>45
Складские кирпичные здания	10 – 20	20 – 30	30 – 40	>40
Одноэтажные складские помещения с металлическим каркасом и стеновым заполнением из листового металла	5 – 7	7 – 10	10 – 15	>15

Тип зданий, сооружений	Степень разрушения при избыточном давлении на фронте ударной волны, кПа			
	Слабая	Средняя	Сильная	Полная
Бетонные и железобетонные здания и антисейсмические конструкции	25 – 35	80 – 120	150 – 200	>200
Котельные, регуляторные станции в кирпичных зданиях	10 – 15	15 – 25	25 – 35	35 – 45
Деревянные дома	6 – 8	8 – 12	12 – 20	> 20
Подземные сети, трубопроводы	400 – 600	600 – 1000	1000 – 1500	1500
Трубопроводы наземные	20	50	130	–
Кабельные подземные линии	До 800	–	–	1500
Цистерны для перевозки нефтепродуктов	30	50	70	80
Резервуары и емкости стальные наземные	35	55	80	90
Подземные резервуары	40	75	150	200

Условная вероятность травмирования и гибели людей, находящихся в зданиях, в зависимости от степени разрушения зданий от воздействия ударной волны определяется по табл. 22.

Таблица 22

Зависимость условной вероятности поражения человека с разной степенью тяжести от степени разрушения здания

Тяжесть поражения	Степень разрушения			
	Полное	Сильное	Среднее	Слабое
Смертельное	0,6	0,49	0,09	0
Тяжелые травмы	0,37	0,34	0,1	0
Легкие травмы	0,03	0,17	0,2	0,05

При воздействии на людей ударная волна вызывает различные по степени тяжести поражения (травмы):

- прямые – от избыточного давления и скоростного напора;
- косвенные – от ударов обломками ограждающих конструкций, осколков стекла и т. д.

По степени тяжести поражения людей от ударной волны делятся:

- на легкие при $\Delta P_{\phi} = 20 - 40$ кПа ($0,2 - 0,4$ кгс/см²), (вывихи, ушибы);
- средние при $\Delta P_{\phi} = 40 - 60$ кПа ($0,4 - 0,6$ кгс/см²), (контузии, кровь из носа и ушей);
- тяжелые при $\Delta P_{\phi} \geq 60$ кПа (тяжелые контузии, повреждения слуха и внутренних органов, потеря сознания, переломы);
- смертельные при $\Delta P_{\phi} \geq 100$ кПа.

Зоны разрушения производственных зданий и сооружений в зависимости от нагрузки, создаваемой ударной волной, можно охарактеризовать следующим образом:

- полные разрушения при $\Delta P_{\phi} \geq 50$ кПа (разрушение всех элементов конструкции зданий);
- сильные разрушения при $\Delta P_{\phi} \geq 30 - 50$ кПа (обрушение 50 % конструкций зданий);
- средние разрушения при $\Delta P_{\phi} = 20 - 30$ кПа (трещины в несущих элементах конструкций, обрушение отдельных участков стен);
- слабые разрушения при $\Delta P_{\phi} \geq 10 - 20$ кПа (повреждения окон, дверей, легких перегородок).

Вероятностные критерии поражения. Для расчета условной вероятности разрушения объектов и поражения людей ударными волнами используются следующие пробит-функции:

а) Вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, может оцениваться по соотношению

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \cdot \ln V_1, \quad (62)$$

где $V_1 = \left(\frac{17500}{\Delta P}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I}\right)^{9,3}$, здесь ΔP – избыточное давление, Па; I – импульс, кг·м/с.

б) Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается по соотношению

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \cdot \ln V_2, \quad (63)$$

где $V_2 = \left(\frac{40\,000}{\Delta P}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I}\right)^{11,3}$.

в) Вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна) в зоне действия ударной волны при взрыве облака топливо-воздушной смеси (ТВС), можно оценить по величине пробит-функции:

$$Pr_3 = 5 - 5,74 \cdot \ln V_3, \quad (64)$$

где $V_3 = \frac{4,2}{\bar{p}} + \frac{1,3}{\bar{i}}$, $\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0}$, $\bar{i} = \frac{I}{P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}}$, здесь m – масса тела живого организма, кг; P_0 – атмосферное давление, 101 325 Па.

г) Вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется по формуле

$$Pr_4 = -12,6 + 1,524 \cdot \ln \Delta P. \quad (65)$$

д) Вероятность отбрасывания человека волной давления оценивается по величине пробит-функции:

$$Pr_5 = 5 - 2,44 \cdot \ln V_5, \quad (66)$$

где $V_5 = \frac{7,38 \cdot 10^{-3}}{\Delta P} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{P \cdot I}$. При использовании пробит-функций в качестве зон 100 % поражения принимаются зоны поражения, где значения пробит-функции достигают величины, соответствующей вероятности 90 %.

Задания для самостоятельной работы

Часть А. Оценить степень разрушения зданий и сооружений различных типов по данным, представленным в табл. 21, а также оценить степень вероятности поражения человека с разной степенью тяжести в соответствии с табл. 22, учитывая степень разрушения здания при различных вариантах избыточного давления (кПа):

1) 25; 2) 50; 3) 75; 4) 100; 5) 125; 6) 150; 7) 175; 8) 200; 9) 250; 10) 300.

Часть Б. В соответствии с данными, представленными в табл. 23, рассчитать вероятность:

а) Повреждений стен промышленных зданий, при которых они подлежат восстановлению без сноса (Pr_1).

б) Повреждений стен промышленных зданий, при которых они подлежат сносу (Pr_2).

в) Длительной потери управляемости у людей при воздействии ударной волны при взрыве облака ТВС (Pr_3).

г) Разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне (Pr_4).

д) Вероятность отбрасывания человека волной давления (Pr_5).

Таблица 23

Данные к заданиям для самостоятельной работы

№ п/п	P_0 (Па)	ΔP (Па)	I (кг·м/с)	m (кг)
1	101 325	235 000	5 000	65
2	100 750	300 000	10 000	60
3	100 500	250 000	15 000	65
4	100 250	200 000	20 000	70
5	100 000	150 000	25 000	75
6	99 750	100 000	50 000	80
7	98 500	50 000	25 000	75
8	99 250	25 000	20 000	70
9	99 000	150 000	15 000	65
10	98 750	200 000	10 000	60

Варианты заданий для самостоятельной работы представлены в табл. 24.

Таблица 24

Номера заданий по вариантам

Номер варианта	Номер задания части А	Номер задания части Б
1	1, 6, 9	4, 5, 7
2	2, 7, 10	6, 8, 9
3	3, 4, 8	2, 4, 6
4	4, 7, 9	1, 2, 4
5	5, 6, 7	3, 4, 9
6	6, 7, 8	4, 5, 7
7	7, 9, 10	5, 6, 9
8	6, 8, 9	2, 4, 6
9	2, 4, 7	1, 3, 8
10	4, 5, 8	2, 4, 7

Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте детерминированные критерии оценки разрушения зданий и сооружений.
2. Охарактеризуйте вероятностные критерии оценки разрушения зданий и сооружений.
3. Опишите пробит-функцию.
4. Охарактеризуйте известные критерии разрушения промышленных зданий от избыточного давления.
5. Охарактеризуйте зоны разрушения производственных зданий и сооружений под влиянием избыточного давления ударной волны.

Лабораторная работа №8

Управление системными рисками при эксплуатации опасных производственных объектов

Цель работы – освоение основ вероятностного управления техноферными рискам при эксплуатации опасных производственных объектов на основе представлений об условной и полной вероятности, а также с помощью формулы Байеса.

Теоретические сведения

Риск пожаров и взрывов наиболее высок на опасных производственных объектах (ОПО) нефтехимического и нефтегазового комплекса, магистральных нефте- и газопроводах, предприятиях угольной и горнодобывающей промышленности, на предприятиях и объектах по производству и складированию взрывчатых веществ и горючих (ГЖ) и легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), нефте- и газохранилищах, на объектах железнодорожного, морского и авиационного транспорта, а также наземной космической инфраструктуры. При этом риск пожара или взрыва на ОПО сопряжен с риском разрушения дорогостоящего технологического оборудования, а также образования и распространения взрывоопасных и высокотоксичных топливно-воздушных смесей (ТВС) и топливно-воздушных облаков (ТВО).

Методические рекомендации к выполнению работы

Допустим, пожар (событие A) может произойти только вместе с любым из событий B_1, B_2, \dots, B_n , обусловленных соответствующим k -м фактором возникновения пожара, образующих полную группу несовместных событий, при этом вероятность пожара (события A) определяется формулой полной вероятности:

$$P(A) = P(B_1) \cdot P(A | B_1) + P(B_2) \cdot P(A | B_2) + \dots + P(B_n) \cdot P(A | B_n). \quad (67)$$

Пусть событие A произошло, тогда можно найти условные вероятности событий $B_1 B_2 \dots B_n$, т. е. вероятности $P(A | B_1)$, $P(A | B_2)$, ..., $P(A | B_n)$. Пожароопасные (взрывоопасные) события $B_1 B_2 \dots B_n$ называются *гипотезами*, а перечисленные вероятности – суть, условные вероятности этих гипотез. Если пожар произошел (событие A), то это изменяет вероятности пожароопасных событий ($B_1 B_2 \dots B_n$). Согласно теореме Байеса можно найти условную

вероятность пожароопасного события B_i при условии того, что пожар (событие A) уже произошел:

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i) \cdot P(A|B_i)}{P(A)}. \quad (68)$$

Тогда вероятность того, что пожар возник вследствие реализации пожароопасного события B_i , можно выразить формулой Байеса:

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i) \cdot P(A|B_i)}{P(B_1) \cdot P(A|B_1) + P(B_2) \cdot P(A|B_2) + \dots + P(B_n) \cdot P(A|B_n)}. \quad (69)$$

Пример 1. Известно, что на ОПО используется 35 ($m_1 = 5$) аппаратов под давлением, 15 ($m_2 = 15$) центробежных насосов, 20 ($m_3 = 20$) центробежных компрессоров и 30 ($m_4 = 30$) резервуаров для хранения ЛВЖ и ГЖ при давлении, близком к атмосферному. При этом возможна разгерметизация оборудования с различной частотой (f), в том числе: аппаратов под давлением – с истечением жидкости, газа или двухфазной среды ($f = 6,2 \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$), центробежных насосов – с истечением жидкости или двухфазной среды ($f = 5,1 \cdot 10^{-4}$ год $^{-1}$), центробежных компрессоров – с последующим истечением газа (для центробежных компрессоров ($f = 3,9 \cdot 10^{-4}$ год $^{-1}$), резервуаров для хранения ГЖ и ЛВЖ при давлении, близком к атмосферному, – с последующим истечением жидкости в обвалование ($f = 8,8 \cdot 10^{-5}$ год $^{-1}$). При разгерметизации с истечением ЛВЖ и ГЖ вероятность возникновения пожара близка к единице. Диаметр отверстий для истечения для оборудования каждого вида составляет 25 мм.

Оценить вероятность пожара на ОПО из-за разгерметизации оборудования каждого вида можно на основе данных из табл. 25.

Решение. Пусть событие A означает возникновение пожара на ОПО. По условию задачи можно предложить четыре гипотезы о выходе из строя аппаратов под давлением (H_1), центробежных насосов (H_2), центробежных компрессоров (H_3), резервуаров для хранения ЛВЖ и ГЖ при давлении, близком к атмосферному, резервуаров (H_4). Наибольшая вероятность того, что неисправным окажется оборудование определенного вида, соответственно $P(H_1)$, $P(H_2)$, $P(H_3)$, $P(H_4)$:

$$1) \quad P(H_1) = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} = \frac{35}{35 + 15 + 20 + 30} = 0,35 \quad - \quad \text{максимальная}$$

вероятность неисправности для аппаратов под давлением;

$$2) \quad P(H_2) = 0,15 \quad - \quad \text{для центробежных насосов;}$$

$$3) \quad P(H_3) = 0,20 \quad - \quad \text{для центробежных компрессоров;}$$

$$4) \quad P(H_4) = 0,30 \quad - \quad \text{для резервуаров для хранения ЛВЖ и ГЖ.}$$

Тогда $P(A | H_i)$ – вероятность возникновения пожара A при условии, что H_i произошло, т. е. вышло из строя оборудование соответствующего вида.

Вероятность возникновения пожара из-за выхода оборудования из строя пропорциональна его частоте:

1) $P(A | H_1) = 6,2 \cdot 10^{-6}$ – вероятность пожара из-за аппаратов под давлением;

2) $P(A | H_2) = 5,1 \cdot 10^{-4}$ – из-за центробежных насосов;

3) $P(A | H_3) = 3,9 \cdot 10^{-4}$ – из-за центробежных компрессоров;

4) $P(A | H_4) = 8,8 \cdot 10^{-5}$ – резервуаров для хранения ЛВЖ и ГЖ.

Полная вероятность возникновения пожара на ОПО из-за неисправности оборудования различных видов: $\sum_{i=1}^4 P(H_i) \cdot P(A | H_i) = 0,00157$.

В задаче требуется найти $P(H_j | A)$ – вероятность того, что пожар возник вследствие пролива ЛВЖ и ГЖ из оборудования j -го вида. Для решения задачи целесообразно воспользоваться формулой Байеса:

$$P(H_j | A) = \frac{P(H_j) \cdot P(A | H_j)}{\sum_{i=1}^4 P(H_i) \cdot P(A | H_i)}.$$

Тогда вероятность возникновения пожара вследствие неисправности аппаратов под давлением:

$$P(H_1 | A) = \frac{0,35 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6}}{0,35 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} + 0,15 \cdot 5,1 \cdot 10^{-4} + 0,2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-4} + 0,3 \cdot 8,8 \cdot 10^{-5}} = 0,014;$$

– вследствие неисправности центробежных насосов:

$$P(H_2 | A) = \frac{0,15 \cdot 5,1 \cdot 10^{-4}}{0,35 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} + 0,15 \cdot 5,1 \cdot 10^{-4} + 0,2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-4} + 0,3 \cdot 8,8 \cdot 10^{-5}} = 0,48;$$

– вследствие неисправности центробежных компрессоров:

$$P(H_3 | A) = \frac{0,2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-4}}{0,35 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} + 0,15 \cdot 5,1 \cdot 10^{-4} + 0,2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-4} + 0,3 \cdot 8,8 \cdot 10^{-5}} = 0,49;$$

– вследствие неисправности резервуаров для хранения ЛВЖ и ГЖ:

$$P(H_4 | A) = \frac{0,3 \cdot 8,8 \cdot 10^{-5}}{0,35 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} + 0,15 \cdot 5,1 \cdot 10^{-4} + 0,2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-4} + 0,3 \cdot 8,8 \cdot 10^{-5}} = 0,017.$$

Ответ: $P(H_1 | A) = 0,014$; $P(H_2 | A) = 0,48$; $P(H_3 | A) = 0,49$;
 $P(H_4 | A) = 0,017$;

Допустим, событие A – возникновение пожара на ОПО. Тогда вероятность пожара $P(A)_{\text{ОПО}}$ пропорциональна занимаемой площади $S(A)_{\text{ОПО}}$ (м^2) и частоте возникновения пожара f (1/год):

$$P(A)_{\text{ОПО}} = S(A)_{\text{ОПО}} \cdot f \cdot \Delta t, \quad (70)$$

где Δt – период времени оценки вероятности возникновения пожара.

Учитывая, что на территории ОПО могут располагаться производственные здания и сооружения (ПЗС) различного назначения, каждое из которых характеризуется собственной частотой возникновения пожара, как показано в табл. 25, вероятность пожара в из i -м ПЗС:

$$P(A)_i = S(A)_{\text{ПЗС}_i} \cdot f_{\text{ПЗС}_i} \cdot \Delta t, \quad (71)$$

где $S(A)_{\text{ПЗС}_i}$ (м^2) – площадь, занимаемая i -м ПЗС; $f_{\text{ПЗС}_i}$ – частота возникновения пожара f (1/год); Δt – период времени оценки вероятности возникновения пожара.

Очевидно, что на территории ОПО присутствуют и действуют факторы и условия, которые обуславливают определенную частоту возникновения пожара, как представлено в табл. 26. Кроме того, в ПЗС, которые расположены на территории этого ТО, присутствуют и действуют еще и другие факторы и условия, определяющие вероятность возникновения пожаров в ПЗС, частота которых представлена в табл. 25. Тогда вероятность возникновения пожара в ПЗС, расположенных на территории ОПО:

$$P(A)_{\text{ПЗС(ОПО)}} = 1 - (1 - P(A)_{\text{ОПО}}) \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{ПЗС}_i}) = \\ = 1 - (1 - S(A)_{\text{ОПО}} \cdot f_{\text{ОПО}} \cdot \Delta t) \prod_{i=1}^n \left(1 - (1 - S(A)_{\text{ПЗС}_i} \cdot f_{\text{ПЗС}_i} \cdot \Delta t) \right). \quad (72)$$

Один из ключевых параметров, используемых при расчете пожарного риска, – частота реализации пожароопасных ситуаций или частота возникновения пожара на объектах техносферы, а также в производственных зданиях и сооружениях таких объектов.

Таблица 25

Показатели частоты возникновения пожара (взрыва) в производственных зданиях и сооружениях на различных объектах техносферы ($\text{м}^2/\text{год}$)

№ п/п	Тип производственных зданий и сооружений	Частота возникновения пожара (взрыва), $\text{м}^2/\text{год}$
1	Административно-бытовой корпус производственного предприятия (АБК)	$7,5 \cdot 10^{-5}$
2	Производственное здание автотранспортного предприятия (ПЗАП)	$5,55 \cdot 10^{-6}$
3	Складское помещение (СП)	$7,2 \cdot 10^{-6}$
4	Стоянка легкового автотранспорта (СЛАТ)	$5,75 \cdot 10^{-6}$
5	Склад многономенклатурной продукции (СМП)	$6,7 \cdot 10^{-6}$
6	Производственный корпус (ПК)	$2,5 \cdot 10^{-6}$
7	Малярный цех (МЦ)	$1,4 \cdot 10^{-6}$
8	Сборочный корпус завода электрооборудования (СКЭО)	$1,75 \cdot 10^{-6}$

№ п/п	Тип производственных зданий и сооружений	Частота возникновения пожара (взрыва), м ² /год
9	Цех маслоэкстракционного производства (ЦМЭП)	$8,25 \cdot 10^{-6}$
10	Торгово-развлекательный центр (ТРЦ)	$8,2 \cdot 10^{-6}$

Таблица 26

Показатели частоты пожара (взрыва) на техносферных объектах (м²/год)

№ п/п	Наименование объекта	Частота возникновения пожара (взрыва), м ² /год
1	Электростанции	$1,2 \cdot 10^{-5}$
2	Склады химической продукции	$3,2 \cdot 10^{-5}$
3	Склады многономенклатурной продукции	$7,5 \cdot 10^{-5}$
4	Инструментально-механические цеха	$1,6 \cdot 10^{-5}$
5	Цеха по производству искусственных волокон	$8,7 \cdot 10^{-5}$
6	Литейные и плавильные цеха	$2,9 \cdot 10^{-5}$
7	Цеха по переработке мяса и рыбы	$4,6 \cdot 10^{-5}$
8	Цеха горячей прокатки металлов	$3,9 \cdot 10^{-5}$
9	Текстильные производства	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Примечание. Данные о вероятности возникновения пожара приведены в расчете на 1 м² площади здания.

Пример 2. На территории текстильного комбината (ТК), площадь которого составляет $S_0 = 3500$ м², возник пожар. Частота возникновения пожара на объекте составляет $3,5 \cdot 10^{-5}$ м²/год. На территории текстильного производства находятся административно-бытовой корпус ($S_1 = 250$ м², $f_1 = 7,5 \cdot 10^{-6}$ м²/год), производственное здание автотранспортного предприятия ($S_2 = 400$ м², $f_2 = 5,55 \cdot 10^{-6}$ м²/год), складское помещение ($S_3 = 650$ м², $f_3 = 7,2 \cdot 10^{-6}$ м²/год), стоянка легкового автотранспорта ($S_4 = 500$ м², $f_4 = 5,75 \cdot 10^{-6}$ м²/год), склад многономенклатурной продукции ($S_5 = 450$ м², $f_5 = 6,7 \cdot 10^{-6}$ м²/год).

Оцените вероятность пожара на ТК из-за возгорания в каждом из типов зданий на территории комбината в течение года, используя данные табл. 25 и 26.

Решение. Обозначим возникновение пожара на ТК как событие A . По условию задачи можно предложить четыре гипотезы о возникновении пожара на ТК под влиянием очага возгорания в i -м ПЗС, таких, как административно-бытовой корпус (АБК) – $H_{\text{АБК}}$, производственное здание автотранспортного предприятия (ПЗАП) – $H_{\text{ПЗАП}}$, складское помещение (СП) – $H_{\text{СП}}$, стоянка легкового автотранспорта (СЛАТ) – $H_{\text{СЛАТ}}$, склад многономенклатурной продукции (СМП) – $H_{\text{СМП}}$.

Вероятность реализации каждой из этих гипотез можно выразить:

$$P(H_{\text{АБК}}) = S(A)_{\text{АБК}} \cdot f_{\text{АБК}} \cdot \Delta t = 250 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,001875;$$

$$P(H_{\text{СП}}) = S(A)_{\text{СП}} \cdot f_{\text{СП}} \cdot \Delta t = 650 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,00468;$$

$$P(H_{\text{СЛАТ}}) = S(A)_{\text{СЛАТ}} \cdot f_{\text{СЛАТ}} \cdot \Delta t = 500 \cdot 5,75 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,002875;$$

$$P(H_{\text{СМП}}) = S(A)_{\text{СМП}} \cdot f_{\text{СМП}} \cdot \Delta t = 450 \cdot 6,7 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,003015.$$

Тогда вероятность возникновения пожара на ТК при условии возгорания различных ПЗС, расположенных на территории комбината:

$$\begin{aligned} P(A | H_{\text{АБК}}) &= 1 - (1 - S(A)_{\text{АБК}} \cdot f_{\text{ТК}} \cdot \Delta t)(1 - S(A)_{\text{АБК}} \cdot f_{\text{АБК}} \cdot \Delta t) = \\ &= 1 - (1 - 250 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1)(1 - 250 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1) = 0,0106; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(A | H_{\text{ПЗАП}}) &= 1 - (1 - S(A)_{\text{ПЗАП}} \cdot f_{\text{ТК}} \cdot \Delta t)(1 - S(A)_{\text{ПЗАП}} \cdot f_{\text{ПЗАП}} \cdot \Delta t) = \\ &= 1 - (1 - 400 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1)(1 - 400 \cdot 5,55 \cdot 10^{-6} \cdot 1) = 0,0162; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(A | H_{\text{СП}}) &= 1 - (1 - S(A)_{\text{СП}} \cdot f_{\text{ТК}} \cdot \Delta t)(1 - S(A)_{\text{СП}} \cdot f_{\text{СП}} \cdot \Delta t) = \\ &= 1 - (1 - 650 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1)(1 - 650 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1) = 0,0273; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(A | H_{\text{СЛАТ}}) &= 1 - (1 - S(A)_{\text{СЛАТ}} \cdot f_{\text{ТК}} \cdot \Delta t)(1 - S(A)_{\text{СЛАТ}} \cdot f_{\text{СЛАТ}} \cdot \Delta t) = \\ &= 1 - (1 - 500 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1)(1 - 500 \cdot 5,75 \cdot 10^{-6} \cdot 1) = 0,0036; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(A | H_{\text{СМП}}) &= 1 - (1 - S(A)_{\text{СМП}} \cdot f_{\text{ТК}} \cdot \Delta t)(1 - S(A)_{\text{СМП}} \cdot f_{\text{СМП}} \cdot \Delta t) = \\ &= 1 - (1 - 450 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1)(1 - 450 \cdot 6,7 \cdot 10^{-6} \cdot 1) = 0,0187. \end{aligned}$$

Полная вероятность пожара на ТК $\sum_{i=1}^5 P(H_i) \cdot P(A | H_i) = 0,00936$.

Для оценки вероятности пожара на территории ТК вследствие возгорания в отдельных ПЗС целесообразно воспользоваться формулой Байеса:

$$P(H_j | A) = \frac{P(A) \cdot P(A | H_j)}{\sum_{i=1}^4 P(H_i) \cdot P(A | H_i)}.$$

Тогда вероятность пожара на ТК по причине возгорания на АБК, ПЗАП, СП, СЛАТ и СМП соответственно:

$$P(H_{\text{АБК}} | A) = \frac{0,1225 \cdot 0,0106}{0,00936} = 0,1388;$$

$$P(H_{\text{СП}} | A) = \frac{0,1225 \cdot 0,0273}{0,00936} = 0,3576;$$

$$P(H_{\text{ПЗАП}} | A) = \frac{0,1225 \cdot 0,0162}{0,00936} = 0,2117;$$

$$P(H_{\text{СЛАТ}} | A) = \frac{0,1225 \cdot 0,0036}{0,00936} = 0,0468;$$

$$P(H_{\text{СМП}} | A) = \frac{0,1225 \cdot 0,0187}{0,00936} = 0,245.$$

Ответ: вероятность пожара на ТК при возгорании в помещении АБК составляет 0,1388; ПЗАП – 0,2117; СП – 0,3576; СЛАТ – 0,0468; СМП – 0,245.

Задания для самостоятельной работы

Часть А. Оцените вероятность пожара на объектах техносферы вследствие разгерметизации технологического оборудования каждого вида, используя данные, представленные в табл. 28.

Часть Б. Оцените вероятность пожара (взрыва) в производственных зданиях и сооружениях на различных объектах техносферы, используя данные, представленные в табл. 29.

Варианты заданий для самостоятельной работы представлены в табл. 27.

Таблица 27

Варианты заданий для самостоятельной работы

Номер варианта	Номер задания части А	Номер задания части Б
1	1, 6, 9	4, 5, 7
2	2, 7, 10	6, 8, 9
3	3, 4, 8	2, 4, 6
4	4, 7, 9	1, 2, 4
5	5, 6, 7	3, 4, 9
6	6, 7, 8	4, 5, 7
7	7, 9, 10	5, 6, 9
8	6, 8, 9	2, 4, 6
9	2, 4, 7	1, 3, 8
10	3, 6, 9	2, 4, 7

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое полная вероятность события?
2. Напишите формулу полной вероятности события.
3. Что такое условная вероятность?
4. При каких условиях можно использовать теорему Байеса?
5. Какие события называются гипотезами?
6. Запишите формулу реализации гипотезы события.
7. Напишите формулу Байеса.

Данные к заданиям для самостоятельного выполнения. Часть А.

Показатели частоты разгерметизации технологического оборудования на объектах техносферы

№ п/п	Наименование оборудования	Иницилирующее аварийно событие	Диаметр отверстия истечения (мм)	Частота разгерметизации (год ⁻¹)	Номер задания																		
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	Резервуары, емкости, сосуды и аппараты под давлением	Разгерметизация с истечением жидкости, газа, двухфазной среды	5	$3,0 \cdot 10^{-5}$	X						X												
2			12,5	$2,2 \cdot 10^{-5}$		X															X		
3			25	$7,9 \cdot 10^{-6}$				X														X	
4			50	$4,8 \cdot 10^{-6}$					X				X										
5			100	$1,5 \cdot 10^{-6}$		X																	
6	Насосы (центробежные)	Разгерметизация с истечением жидкости или двухфазной среды	5	$3,7 \cdot 10^{-3}$			X														X		
7			12,5	$8,1 \cdot 10^{-4}$				X															
8			25	$2,6 \cdot 10^{-4}$							X												X
9			50	$1,2 \cdot 10^{-4}$								X											
10	Компрессоры (центробежные)	Разгерметизация с истечением газа	5	$1,9 \cdot 10^{-2}$		X																X	
11			12,5	$3,1 \cdot 10^{-3}$				X															X
12			25	$2,9 \cdot 10^{-4}$		X								X									
13			50	$4,5 \cdot 10^{-4}$																			
14	Резервуары для хранения ЛВЖ и ГЖ при давлении, близком к атмосферному	Разгерметизация с истечением жидкости в обвалование	25	$4,5 \cdot 10^{-5}$			X															X	
15			100	$3,3 \cdot 10^{-5}$					X														X

Примечания:

1. «X» – производственные здания и сооружения, находящиеся на объекте техносферы.
2. При отсутствии необходимых данных допускается принимать частоту внешнего воздействия, приводящего к реализации огненного шара, равной $2,5 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ на один аппарат (резервуар).

Данные к заданиям для самостоятельного выполнения. Часть Б.
Показатели частоты возникновения пожара (взрыва) в производственных зданиях и сооружениях на различных объектах техносферы (м²/год)

Номер задания	Наименование объекта (площадь, м ²)	Частота возникновения пожара (взрыва), м ² /год	Административно-бытовой корпус (АБК), 250 м ²	Производственное здание автотранспортного предприятия (ПЗАП), 450 м ²	Складское помещение (СП), 300 м ²	Стоянка легкового автотранспорта (САТ), 450 м ²	Склад многономенклатурной продукции (СМП), 450 м ²	Производственный корпус (ПК), 450 м ²	Маярный цех (МП), 450 м ²	Сборочный корпус завода электрооборудования (СКЗО), 450 м ²	Цех маслоэкстракционного производства (ЦМП), 450 м ²	Торгово-развлекательный центр (ТРЦ), 4500 м ²
1	Электростанция (4500 м ²)	1,2·10 ⁻⁵	X					X				
2	Склады химической продукции (4500 м ²)	3,2·10 ⁻⁵	X				X		X		X	
3	Склады многономенклатурной продукции (5200 м ²)	7,5·10 ⁻⁵		X	X	X		X				
4	Инструментально-механические цеха (2750 м ²)	1,6·10 ⁻⁵	X				X	X				
5	Цеха по производству искусственных волокон (3350 м ²)	8,7·10 ⁻⁵	X		X	X		X		X		
6	Литейные и плавильные цеха (5500 м ²)	2,9·10 ⁻⁵	X	X	X		X					
7	Цеха по переработке мяса и рыбы (3500 м ²)	4,6·10 ⁻⁵			X	X	X					
8	Цеха горячей прокатки металлов (4750 м ²)	3,9·10 ⁻⁵	X		X	X	X					
9	Текстильные производства (4250 м ²)	3,5·10 ⁻⁵	X		X		X					X

Примечание. «X» – производственные здания и сооружения, находящиеся на объекте техносферы.

Таблица значений функции $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	0,3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	0,3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	0,3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697
0,4	0,3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	0,3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	0,3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	0,3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	0,2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	0,2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2458	2444
1,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	0,2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	0,1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	0,1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	0,1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	0,1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	0,1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0,0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804
1,8	0,0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681	0669
1,9	0,0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551
2,0	0,0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459	0449
2,1	0,0440	0431	0422	0413	0404	0396	0387	0379	0371	0363
2,2	0,0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297	0290
2,3	0,0283	0277	0270	0264	0258	0252	0246	0241	0235	0229
2,4	0,0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184	0180
2,5	0,0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143	0139
2,6	0,0136	0132	0129	0126	0122	0119	0116	0113	0110	0107
2,7	0,0104	0101	0099	0096	0093	0091	0088	0086	0084	0081
2,8	0,0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063	0061
2,9	0,0060	0058	0056	0055	0053	0051	0050	0048	0047	0046
3,0	0,0044	0043	0042	0040	0039	0038	0037	0036	0035	0034
3,1	0,0033	0032	0031	0030	0029	0028	0027	0026	0025	0025
3,2	0,0024	0023	0022	0022	0021	0020	0020	0019	0018	0018
3,3	0,0017	0017	0016	0016	0015	0015	0014	0014	0013	0013
3,4	0,0012	0012	0012	0011	0011	0010	0010	0010	0009	0009
3,5	0,0009	0008	0008	0008	0008	0007	0007	0007	0007	0006
3,6	0,0006	0006	0006	0005	0005	0005	0005	0005	0005	0004
3,7	0,0004	0004	0004	0004	0004	0004	0003	0003	0003	0003
3,8	0,0003	0003	0003	0003	0003	0002	0002	0002	0002	0002
3,9	0,0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001	0001

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица значений функции $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\} dz$

х	Φ(х)	х	Φ(х)								
0	0	0,47	0,1808	0,94	0,3264	1,41	0,4207	1,88	0,4699	3	0,4987
0,01	0,004	0,48	0,1844	0,95	0,3289	1,42	0,4222	1,9	0,4713	3,2	0,4993
0,02	0,008	0,49	0,1879	0,96	0,3315	1,43	0,4236	1,92	0,4726	3,4	0,4997
0,03	0,012	0,5	0,1915	0,97	0,334	1,44	0,4251	1,94	0,4738	3,6	0,4998
0,04	0,016	0,51	0,195	0,98	0,3365	1,45	0,4265	1,96	0,475	3,8	0,4999
0,05	0,0199	0,52	0,1985	0,99	0,3389	1,46	0,4279	1,98	0,4761	4	0,5
0,06	0,0239	0,53	0,2019	1	0,3413	1,47	0,4292	2	0,4772	∞	0,5
0,07	0,0279	0,54	0,2054	1,01	0,3438	1,48	0,4306	2,02	0,4783		
0,08	0,0319	0,55	0,2088	1,02	0,3461	1,49	0,4319	2,04	0,4793		
0,09	0,0359	0,56	0,2123	1,03	0,3485	1,5	0,4332	2,06	0,4803		
0,1	0,0398	0,57	0,2157	1,04	0,3508	1,51	0,4345	2,08	0,4812		
0,11	0,0438	0,58	0,219	1,05	0,3531	1,52	0,4357	2,1	0,4821		
0,12	0,0478	0,59	0,2224	1,06	0,3554	1,53	0,437	2,12	0,483		
0,13	0,0517	0,6	0,2257	1,07	0,3577	1,54	0,4382	2,14	0,4838		
0,14	0,0557	0,61	0,2291	1,08	0,3599	1,55	0,4394	2,16	0,4846		
0,15	0,0596	0,62	0,2324	1,09	0,3621	1,56	0,4406	2,18	0,4854		
0,16	0,0636	0,63	0,2357	1,1	0,3643	1,57	0,4418	2,2	0,4861		
0,17	0,0675	0,64	0,2389	1,11	0,3665	1,58	0,4429	2,22	0,4868		
0,18	0,0714	0,65	0,2422	1,12	0,3686	1,59	0,4441	2,24	0,4875		
0,19	0,0753	0,66	0,2454	1,13	0,3708	1,6	0,4452	2,26	0,4881		
0,2	0,0793	0,67	0,2486	1,14	0,3729	1,61	0,4463	2,28	0,4887		
0,21	0,0832	0,68	0,2517	1,15	0,3749	1,62	0,4474	2,3	0,4893		
0,22	0,0871	0,69	0,2549	1,16	0,377	1,63	0,4484	2,32	0,4898		
0,23	0,091	0,7	0,258	1,17	0,379	1,64	0,4495	2,34	0,4904		
0,24	0,0948	0,71	0,2611	1,18	0,381	1,65	0,4505	2,36	0,4909		
0,25	0,0987	0,72	0,2642	1,19	0,383	1,66	0,4515	2,38	0,4913		
0,26	0,1026	0,73	0,2673	1,2	0,3849	1,67	0,4525	2,4	0,4918		
0,27	0,1064	0,74	0,2704	1,21	0,3869	1,68	0,4535	2,42	0,4922		
0,28	0,1103	0,75	0,2734	1,22	0,3888	1,69	0,4545	2,44	0,4927		
0,29	0,1141	0,76	0,2764	1,23	0,3907	1,7	0,4554	2,46	0,4931		
0,3	0,1179	0,77	0,2794	1,24	0,3925	1,71	0,4564	2,48	0,4934		
0,31	0,1217	0,78	0,2823	1,25	0,3944	1,72	0,4573	2,5	0,4938		
0,32	0,1255	0,79	0,2852	1,26	0,3962	1,73	0,4582	2,52	0,4941		
0,33	0,1293	0,8	0,2881	1,27	0,398	1,74	0,4591	2,54	0,4945		
0,34	0,1331	0,81	0,291	1,28	0,3997	1,75	0,4599	2,56	0,4948		
0,35	0,1368	0,82	0,2939	1,29	0,4015	1,76	0,4608	2,58	0,4951		
0,36	0,1406	0,83	0,2967	1,3	0,4032	1,77	0,4616	2,6	0,4953		
0,37	0,1443	0,84	0,2995	1,31	0,4049	1,78	0,4625	2,62	0,4956		
0,38	0,148	0,85	0,3023	1,32	0,4066	1,79	0,4633	2,64	0,4959		
0,39	0,1517	0,86	0,3051	1,33	0,4082	1,8	0,4641	2,66	0,4961		
0,4	0,1554	0,87	0,3078	1,34	0,4099	1,81	0,4649	2,68	0,4963		
0,41	0,1591	0,88	0,3106	1,35	0,4115	1,82	0,4656	2,7	0,4965		
0,42	0,1628	0,89	0,3133	1,36	0,4131	1,83	0,4664	2,72	0,4967		
0,43	0,1664	0,9	0,3159	1,37	0,4147	1,84	0,4671	2,74	0,4969		
0,44	0,17	0,91	0,3186	1,38	0,4162	1,85	0,4678	2,76	0,4971		
0,45	0,1736	0,92	0,3212	1,39	0,4177	1,86	0,4686	2,78	0,4973		
0,46	0,1772	0,93	0,3238	1,4	0,4192	1,87	0,4693	2,8	0,4974		

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ безопасности установок и технологий. Методическое пособие по проблемам регулирования риска / под общ. ред. С. В. Петрина. – Саратов : ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. – 384 с.
2. Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / П. Г. Белов. – М. : Изд. центр «Академия», 2003. – 512 с.
3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник / Е. С. Вентцель. – 8-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2002. – 575 с.
4. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – 10-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2004. – 480 с.
5. ГОСТ Р 12.3.047–2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М., 2012. – 62 с.
6. Калявин, В. П. Надежность и диагностика элементов электроустановок : учеб. пособие для вузов / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. – СПб. : Элмор, 2009. – 331 с.
7. Козлитин, А. М. Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы / А. М. Козлитин, А. И. Попов. – Саратов : СГТУ, 2000. – 216 с.
8. Козлитин, А. М. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование и оценка: детерминированные методы количественной оценки опасностей техносферы : учеб. пособие А. М. Козлитин, Б. Н. Яковлев ; под ред. А. И. Попова. – Саратов : СГТУ, 2000. – 124 с.
9. Котляревский, В. А. Безопасность резервуаров и трубопроводов / В. А. Котляревский, А. А. Шаталов, Х. М. Ханухов. – М. : Экономика и информатика, 2000. – 552 с.
10. Надежность систем энергетики и их оборудования : справочник. В 4 т. Т. 2 : Надежность электроэнергетических систем / под общ. ред. Ю. Н. Руденко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
11. Микрюков, В. Ю. Безопасность жизнедеятельности : учебник / В. Ю. Микрюков. – М., 2011. – 251 с.
12. Острейковский, В. А. Теория надежности : учебник для вузов / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 2003. – 463 с.
13. Папков, Б. В. Надежность систем электроснабжения : учеб. пособие / Б. В. Папков, Д. Ю. Пашали. – Уфа : УГАТУ, 2007. – 192 с.
14. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : пособие / А. А. Абашкин [и др.]. – М. : ВНИИПО, 2014. – 226 с.

Учебное издание

Давыдовский Анатолий Григорьевич

**БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕХНОСФЕРНЫХ РИСКОВ**

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. И. Герман*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *Е. Д. Стенусь*

Подписано в печать 19.03.2018. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,3. Тираж 60 экз. Заказ 146.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6