

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ**

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**

**ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**КАФЕДРА «БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ЗАЩИТА  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ»**

**Есипов Ю. В., Пустовая Л. Е., Черемисин А.И.**

Учебное пособие

**«Методы расчета показателей безопасности и риска»**

Ростов – на – Дону

2016

Авторы: профессор, д.т.н. Есипов Ю.В.

доцент, к.х.н. Пустовая Л.Е.

доцент, к.т.н. Черемисин А.И.

УДК 621.8

Методы расчета показателей безопасности и риска. Учебное пособие для студентов направления «Техносферная безопасность», «Пожарная безопасность». /ДГТУ. Ростов-на-Дону. 2016. 84 с.

Предназначена для студентов направления «Техносферная безопасность», «Пожарная безопасность» очной и заочной формы обучения.

Печатается по решению методической комиссии факультета «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология».

Научный редактор – д.т.н., профессор Месхи Б.Ч.

Рецензенты – профессор кафедры безопасности и химии ЮФУ

д.т.н., профессор Петров Виктор Владимирович;

– профессор кафедры безопасности технологических процессов и производств д.м.н., профессор Евсупов Владимир Михайлович

© Издательский центр ДГТУ,  
2016

## Содержание

Введение.....	6
1. Теоретические основы расчета показателей безопасности системы.....	8
1.1. Основные понятия и определения безопасности системы.....	8
1.2. Анализ способов расчета показателей безопасности и (или) риска системы.....	10
1.3. Алгоритм расчета показателей безопасности и риска системы .....	13
1.4. Правила построения логической модели вершинного исхода.....	14
1.5. Определение мер вероятности и возможности возникновения происшествий.....	15
1.5.1. Правила определения вероятности и возможности по логической модели происшествия.....	15
1.5.2. Элементарные правила преобразования от логической (булевой) модели в вероятностную модель.....	16
1.5.3. Элементарные правила преобразования от логической (булевой) модели в нечёткую (возможностную) модель .....	17
1.5.4. Типовые примеры построения вероятностной функции происшествия.....	18
1.5.5. Типовые примеры построения возможностной функции происшествия .....	19
1.6. Установление меры определенности вершинного исхода на основе параметрического критерия «воздействие – больше восприимчивости»....	19
1.7. Расчет возможностной меры вершинного исхода в модели «нечеткое воздействие – нечеткая восприимчивость» .....	24
1.8. Объединенный вариант расчета меры вероятности и возможности по приведенному параметрическому запасу безопасности.....	29
1.9. Изучение основных вариантов расчета вероятностной и возможностной мер .....	30
1.9.1. Дизъюнктивная форма вершинного исхода.....	31

1.9.2. Конъюнктивная форма вершинного исхода .....	31
1.9.3. Расчет мер определенности ВИ по значениям приведенного параметрического запаса безопасности.....	32
Выводы к разделу 1 .....	33
Список литературы к разделу 1.....	34
2. Расчет показателей безопасности и риска конкретных технических систем.....	36
2.1. Химико-физический анализ и оценка возможности пожара в системе «котельная – факторы – защита – работники» .....	36
2.2. Оценка вероятностной меры пожара при условии травления пропана	38
2.3. Разработка логической и факторной параметрической модели вершинного исхода: «воспламенение и пожар в зале посетителей» бара ...	41
2.4. Разработка предложений и способов повышения пожарной безопасности конкретного объекта.....	46
2.5. Оценка показателей риска профессиональных заболеваний работников.....	50
Выводы к разделу 2. ....	52
Список литературы к разделу 2.....	55
3. Расчет количественной меры вершинных исходов для тест-объекта – крысы при действии наноразмерного диоксида титана.....	56
3.1. Введение .....	56
3.2. Методика эксперимента.....	56
3.3. Постановка и результаты решения задачи.....	58
Выводы к разделу 3 .....	60
Список литературы к разделу 3.....	61
4. Логико-возможностное обоснование страховых взносов.....	63
4.1. Оценка стоимости интегрального риска (возможных потерь) в системе «спортсмен – соревновательная и тренировочная среда».....	64

4.2. Логико-возможностная оценка уровней страховых взносов в нетипичных системах .....	67
Выводы к разделу 4. ....	72
Список литературы к разделу 4.....	721
Заключение.....	73
5. Методика выполнения контрольных работ.....	75
5.1. Теоретические вопросы.....	77
5.2. Методические вопросы.....	78
5.3. Экспертные вопросы.....	78
5.4. Расчетные задачи.....	80
5.5. Дополнительные вопросы и задачи для самоконтроля.....	82
Список рекомендуемой литературы.....	83

## **Введение**

Данное учебно-методическое пособие опирается на ранее изданные работы авторов и представляет собой попытку с инженерных позиций изложить и раскрыть на примерах порядок и последовательность действий эксперта по построению логических моделей и параметрических условий возникновения происшествий и их предпосылок преимущественно с помощью параметрической модели «воздействие – ослабление – восприимчивость». Рассмотрение поставленных в книге задач основано как на оригинальной формализации исходных данных и требований к ним. Была выполнена существенная доработка теоретического материала книги «Мониторинг и оценка риска систем “защита – объект – среда”» [Есипов, Самсонов, Черемисин, 2007] с целью упрощения решения практических задач экспертизы технических и экологических систем. В дополнение к логико-вероятностному [Махутов, Рябинин, Можаяев] даже для автономного эксперта (без применения на первом этапе экспертизы интеллектуальной системы) апробирован логико-возможностный способ определения показателей безопасности и риска многофакторных и многосвязных систем различной природы.

Первостепенными задачами, которые поставлены и должны быть решены в представляемой работе, являются:

1) разработка алгоритмов и методик расчета показателей безопасности и риска на основе подготовки исходных данных о видах факторов и интервалах значений параметров воздействия и восприимчивости в штатных и аварийных условиях системы;

2) построение и накопление типовых логических и параметрических моделей вершинных исходов (происшествий или аварий);

3) разработка и апробация правил верификации на основе сравнительного анализа результатов расчета вероятностных и возможностных показателей безопасности и риска.

На основании решения указанных задач может быть обоснован подход, который позволяет хотя бы приближенно, но унифицировано, оценить ущерб здоровью человека или качеству объекта. Или величину суммарного (интегрального) риска для некоторой совокупности разнородных систем. Всё это позволяет на уровне достигнутой приближенности проводить сравнительный анализ безопасности или устанавливать относительную приемлемость риска систем по принципу «пусть приближенно, но однообразно»!

Дополнительной целью работы является также демонстрация возможности получения “материальной” и “стоимостной” форм интегрального риска для дальнейшего проведения сравнительного анализа разнородных сложных и (или) уникальных технических систем, обоснования способов и мер защиты и охраны труда, а также обоснования решения задач страхования, в частности назначения компромиссных страховых взносов для страхователей и страховщиков.

## **1. Теоретические основы расчета показателей безопасности системы**

### **1.1. Основные понятия и определения безопасности системы**

Рассматривается техническая система «объект – защита – среда – человек (работник, бригада)».

Определим безопасность как свойство технической системы с заданной вероятностью не допустить или исключить возникновение происшествий.

С позиции оценки и обоснования безопасности техническая система рассматривается в следующем виде: «потенциально опасный объект как конструкция и функциональное устройство содержащее совокупность потенциально опасных элементов различной физико-химической природы – внешние и внутренние (вторичные) опасные и (или) вредные факторы – правовые, организационные, технические и конструктивные способы и средства защиты – исполнители (работник, бригада)».

Как правило, к происшествиям относятся следующие сложные события:

1) несчастный случай; 2) профессиональное заболевание; 3) авария; 4) катастрофа; 5) активный отказ самого критического потенциально опасного элемента объекта. Предпосылками конкретного происшествия называют любые возможные простые события, явления и (или) их связи, логически предопределяют или реализуют (способные реализовать) это происшествие в данной системе.

Построение логической модели основано на использовании и формализации словесного определения (лингвистической модели) происшествия.

Рассмотрим следующие происшествия: 1) несчастный случай; 2) профессиональное заболевание; 3) авария; 4) катастрофа.

**Несчастный случай** это – происшествие, связанное, как правило, с кратковременным и однократным воздействием на исполнителя (человека)



опасных и (или) вредных факторов, способных даже в условиях применения конкретной защиты привести к травме, увечью или летальному исходу.

**Профессиональное заболевание** это – происшествие, связанное, как правило, с длительным и многократным воздействием на исполнителя (человека) опасных и (или) вредных факторов, способных даже в условиях применения конкретной защиты привести к ухудшению здоровья и трудоспособности или летальному исходу исполнителей.

**Авария** это – происшествие, связанное с повреждением и (или) отказом потенциально опасного объекта и возникновением опасных и (или) вредных факторов, действие которых способно даже в условиях применения конкретной защиты привести к травме, увечью исполнителей.

**Катастрофа** это – происшествие, связанное с повреждением и (или) отказом потенциально опасного объекта и возникновением опасных и (или) вредных факторов, действие которых способно даже в условиях применения конкретной защиты привести к гибели исполнителей и полному разрушению объектов и средств труда.

Приведенные лингвистические модели позволяют построить следующие логические модели этих видов происшествий.

На основе принципа предопределенности формально любое происшествие, как сложное событие, происходящее (способное произойти) в рассматриваемой системе, можно назвать «вершинным исходом» реализации предпосылок, выявленных с помощью анализа или экспертизы. Причем варианты реализации происшествия составляют полную группу несовместных исходов. В рамках этой группы понятие «вершинный исход» означает наихудший (самый опасный, вредный и «ущербный») вариант развития.

Вероятность наступления вершинного исхода определяется на основе:

1) установления экспертом или стандартной процедурой логической связи предпосылок относительно этого вершинного исхода,

2) нахождения значений теоретической (гипотетической) вероятности или её статистической оценки или её асимптоты в виде меры субъективной вероятности, называемой «возможностной» или «нечеткой» мерой.

Таким образом, для количественного выражения безопасности на основе формулировок лингвистических моделей происшествий в системе введены такие понятия как «вершинный исход» и «объективная» или «субъективная» вероятность его наступления. Как правило, при экспертизе безопасности системы относительно каждого отдельно взятого вершинного исхода на основе инженерного анализа получают полные и достоверные логические модели.

## **1.2. Анализ способов расчета показателей безопасности и (или) риска системы**

Анализ способов расчета вероятности наступления вершинного исхода в технической системе можно свести к следующему. Из общих представлений вследствие неполноты, недостоверности и недостатка средств для анализа безопасности технической или технологической, или экологической системы вероятность наступления вершинного исхода (ВИ) классифицируют как «объективную» или «субъективную» меру.

«Объективная» вероятность события, процесса или исхода представляет собой меру определенности, которую находят классическими методами в рамках сигнатуры (совокупности математических операций) теории вероятностей, применяемой в булевой алгебре или в алгебре четких множеств. При выборе простейшего варианта этой сигнатуры принимают следующие положения:

- 1) рассматривается полная группа несовместных событий (процессов или исходов), элементарным примером которой является следующая дизъюнкция булевых переменных: логическая сумма логических переменных «икс» или «не икс» равна единице;

2) действует алгебра вероятностных мер, в рамках которой выбирают:

- а) правила сложения и умножения вероятностей,
- б) правила дополнения,
- в) правила инверсии и отрицания.

С учетом такого представления «объективную» вероятность события, процесса или исхода ищут и находят на основе следующих методов, моделей и правил.

1.1 На основе логико-вероятностного метода при условии:

1.1.1 наличия исходных данных о вероятности или

1.1.2 о частоте реализации событий – предпосылок.

1.2 На основе вероятностной модели «случайный параметр воздействия – случайный параметр восприимчивости» как основа для расчета вероятности (1.1.1) при условии наличия (принятия гипотезы о) функций распределения вероятности параметров воздействия и восприимчивости.

1.3 На основе вероятностной функции связности ВИ, полученной путем преобразования из логической модели этого ВИ, и подстановкой в качестве аргументов данных (1.1.2) о частотах реализации событий – предпосылок.

В отличие от логико-вероятностного так называемый «логико-возможностный» способ нахождения и расчета «субъективной» вероятности как асимптоты (Поспелов, Клир, Прад) «объективной» вероятности события, процесса или исхода включает следующие этапы.

2.1 Построение логической модели ВИ и её преобразование нечеткую функции связности с подстановкой в качестве аргументов данных о нечетких (возможностных) мерах реализации событий – предпосылок, которые рассчитывают с помощью:

2.2.1 параметрической модели вида «нечеткий параметр воздействия – нечеткий параметр восприимчивости» или

2.2.2 путем подстановки неполных и (или) недостоверных данных о частотах реализации событий – предпосылок «типа» (1.1.2).

Таким образом, применение рассмотренных способов нахождения и расчета вероятности события или исхода позволяют их применять для решения значительного круга задач по оценке и обоснованию показателей безопасности и риска сложных технических и экологических систем.

Применение предлагаемой в книге методологии для оценки показателей риска систем вида “защита – объект – среда – человек” включает подготовительный и основной этапы. Как следует из названия, на подготовительном этапе ведётся поиск, выявление и выполняется, по возможности, полная и достоверная подготовка исходных данных по установленным формам. Разумеется, что этот этап предполагает творческую работу для экспертов.

Операции основного этапа сводятся к следующему:

- 1) ранжируют по значимости и устанавливают связность возможных происшествий и их предпосылок;
- 2) производят факторное параметрическое описание происшествий, их предпосылок и последствий;
- 3) относительно выбранных исходов определяют функции связности предпосылок происшествий;
- 4) на основе исходных данных в форме параметров лингвистической модели вида “воздействие – каналирование – восприимчивость – отказ или инициирование вторичных воздействий” рассчитывают возможность и (или) вероятностную меру наступления происшествий;
- 5) по результатам расчетов, уточнения исходных и промежуточных данных вычисляют показатели безопасности, а также дифференциальные и интегральные показатели риска конкретно взятой системы;
- 6) выполняют сравнительный анализ разнородных технических систем;
- 7) на основании полученных результатов решают задачи обоснования защитных мероприятий, повышения безопасности или страхования.

### 1.3. Алгоритм расчета показателей безопасности и риска системы

Для конкретной технической системы «объект – защита – среда – человек (бригада)» алгоритм расчета показателей безопасности состоит из следующих этапов или задач:

1. выбрать вершинный исход,
2. установить его предпосылки,
3. построить лингвистическую модель реализации вершинного исхода,
4. построить логическую модель с учетом, по возможности, полного набора связей предпосылок,
5. для каждой предпосылки построить параметрическую модель её реализации на основе модели «воздействие – ослабление – восприимчивость»,
6. на основе выбора (обоснования) для неё производных параметров, с учетом проведения инженерной экспертизы конкретно взятой технической системы ТС1 в рамках (терминах) модели «воздействие – ослабление – восприимчивость» составить таблицы значений «ядер» и интервалов «размытости»,
7. рассчитать возможностные меры (ВМ) реализации элементарных предпосылок,
8. построить возможностную форму функции реализации вершинного исхода,
9. подставить в неё возможностные меры реализации элементарных предпосылок и
10. получить итоговый результат в виде значения ВМ возникновения вершинного исхода в конкретно рассматриваемой ТС1.

Как правило, задачи 1, 2 и 3 носят исследовательский характер и могут быть решены экспертом или искусственной интеллектуальной системой (ИИС) на основе полного и точного анализа конкретной технической

системы с позиции её потенциальной опасности самой себе, другим подсистемам или надсистемам, или окружающей среде.

После проведения этих этапов далее техническая система рассматривается в следующем виде: «потенциально опасный объект как конструкция и функциональное устройство содержащее совокупность потенциально опасных элементов различной физико-химической природы – внешние и внутренние (вторичные) опасные и (или) вредные факторы – правовые, организационные, технические и конструктивные способы и средства защиты – исполнители».

#### 1.4. Правила построения логической модели вершинного исхода

Рассмотрим элементарные логические модели на основе неповторных булевых функций и их дизъюнктивной и конъюнктивной форм. Опишем элементарные формы логической модели (ЛМ) вершинного исхода.

Минимальная дизъюнктивная форма (МДФ):  $y = x_1 \vee x_2$ .

Минимальная конъюнктивная форма (МКФ):  $y = x_1 \wedge x_2$ .

Опишем приведение логических моделей к МДФ и МКФ на примерах.

Пример приведения ЛМ к ДФ:

$$y = x_1 \vee x_2 \wedge x_3 = x_1 \vee (x_2 \wedge x_3) = x_1 \vee z_1, \quad (1.1)$$

где введена промежуточная переменная  $z = (x_2 \wedge x_3)$ .

Пример приведения ЛМ к КФ:

$$y = x_1 \vee x_2 \wedge x_3 = (x_1 \vee x_2) \wedge x_3 = z \wedge x_3, \quad (1.2)$$

где введена промежуточная переменная  $z = (x_1 \vee x_2)$ .

Пример получения ДФ из произвольной неповторной ЛМ.

Пусть дана следующая произвольная неповторная ЛМ

$$y = (x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4) \vee (x_5 \wedge x_6) \wedge x_7. \quad (1.3)$$

Приведем её к МДФ:

$$y = z_1 \vee z_2 \vee z_3, \quad (1.4)$$

где промежуточные переменные

$$z_1 = x_1 \wedge x_2; z_2 = x_3 \wedge x_4; z_3 = x_5 \wedge x_6 \wedge x_7.$$

Пример получения КФ из произвольной неповторной ЛМ.

Дана следующая произвольная неповторная ЛМ

$$y = (x_1 \vee x_2) \wedge (x_3 \wedge x_4) \wedge (x_5 \vee x_6) \wedge x_7. \quad (1.5)$$

Приведем её к МКФ следующим образом.

$$\begin{aligned} y &= (x_1 \vee x_2) \wedge (x_3 \wedge x_4) \wedge (x_5 \vee x_6) \wedge x_7 = \\ &= (x_1 \vee x_2) \wedge (x_5 \vee x_6) \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge x_7 = \\ &= z_1 \wedge z_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge x_7, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где промежуточные переменные  $z_1 = x_1 \vee x_2$ ,  $z_2 = x_5 \vee x_6$ .

## 1.5. Определение мер вероятности и возможности возникновения происшествий

### 1.5.1. Правила определения вероятности и возможности по логической модели происшествия

Преобразование логической (булевой) функции происшествия (ЛМП),  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_l)$ , в вероятностную и возможностьную (нечёткую) формы происшествия (которые представим, соответственно, аббревиатурами – ВФП и НФП) выполним следующим образом.

Вероятностную форму функции происшествия (как выполнение следующего логического условия:  $y = 1$ ) представим в виде

$$\text{Pro}(y = 1) = F_B(p_1, p_2, \dots, p_l), \quad (1.7)$$

где  $\text{Pro}(\cdot)$  – оператор вероятности (probability);

функция  $F_B(\cdot)$  есть алгебраическая форма функции вероятности, заданная на множестве  $\{p_i\}$  вещественных переменных – вероятностей исходов

$$\text{Pro}(x_i = 1) = p_i, \quad (1.8)$$

получаемая как результат применения элементарных правил преобразования от логической в вероятностную модель.

Нечеткую (возможностную) форму (НФ) функции происшествия, которое также представим как выполнение условия,  $y = 1$ , запишем в виде

$$\text{Pos}(y = 1) = F_H(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_l), \quad (1.9)$$

где  $\text{Pos}(\cdot)$  – оператор возможности (possibility);

$F_H(\cdot)$  – заданная на «нечеткой» сигнатуре нечеткая (возможностная) форма (НФ) функции реализации ВИ от множества  $\{\pi_i\}$  вещественных переменных – возможностных (нечётких) мер исходов  $\text{Pos}(x_i = 1) = \pi_i$ , которая есть результат применения элементарных правил преобразования от ЛМ в НФ.

### 1.5.2. Элементарные правила преобразования от логической (булевой) модели в вероятностную модель

Элементарные правила преобразования от логической (булевой) модели в вероятностную модель имеют следующий вид.

1) Булевы переменные  $y$  и  $x_i$ , принимающие значения:  $0 \vee$  (или)  $1$ , заменяют переменными  $P$  и  $p_i$ , которые заданы на интервале  $[0, 1]$  вещественных чисел. Причем отметим, что значение  $p_i = 0$  означает, что выполнение условия  $x_i = 1$  невозможно или невыполнимо. Тогда как условие  $p_i = 1$  означает, что условие  $x_i = 1$  достоверно.

2) Операцию логического сложения (дизъюнкцию) двух переменных  $x_1 \vee x_2$  заменяют на основе преобразования вида:

$$y = x_1 \vee x_2 \rightarrow P = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2). \quad (1.10)$$

3) Операцию логического умножения (конъюнкцию) двух переменных  $x_1 \wedge x_2$  заменяют операцией вида:

$$y = x_1 \wedge x_2 \rightarrow P = p_1 \cdot p_2. \quad (1.11)$$



4) Операцию отрицания «не  $x_I$ » (причем  $x_I \vee$  (или) «не  $x_I$ » = 1) заменяют преобразованием вида:

$$y = \text{не } x_I \rightarrow P = 1 - p_I. \quad (1.12)$$

### 1.5.3. Элементарные правила преобразования от логической (булевой) модели в нечёткую (возможностную) модель

1) Булевы переменные  $y$  и  $x_i$ , принимающие значения: 0  $\vee$  (или) 1, заменяют переменными, далее называемыми возможностными (нечёткими) мерами,  $\Pi$  и  $\pi_i$ , которые заданы на интервале  $[0, 1]$  вещественных чисел. Причем значение  $\pi_i = 0$  означает, что выполнение условия  $x_i = 1$  не возможно с уверенностью  $1 - \alpha$ , где  $\alpha$  – уровень различимости нечетких параметров, с помощью которых описывают условие  $x_i = 1$ . Физический смысл этому поясняется при определении возможностной меры на основе параметрической модели происхождения «воздействие – восприимчивость» (см. п.1.7)

2) Преобразование логической функции происхождения в её возможностную форму основано на использовании следующих элементарных операций – замещений:

2.1. булева переменная  $x_i$  замещается соответствующей возможностной мерой  $\pi_i$ :

$$x_i \rightarrow \pi_i; \quad (1.13)$$

2.2. операция «логическое и» ( $\wedge$ ) замещается операцией ( $\min$ ) из сигнатуры четких и нечетких множеств:

$$\wedge \rightarrow \min; \quad (1.14)$$

2.3. операция «логическое или» ( $\vee$ ) замещается операцией ( $\max$ ) из сигнатуры четких и нечетких множеств:

$$\vee \rightarrow \max. \quad (1.15)$$

#### 1.5.4. Типовые примеры построения вероятностной функции происшествия

Рассмотрим следующие элементарные типовые логические функции, с помощью которых можно анализировать и учитывать неповторные предпосылки происшествия.

$$\begin{aligned} 1) y = x_1 \vee x_2; \rightarrow \text{Pro}(y = 1) = P = 1 - q_1 \cdot q_2 = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) = \\ = p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2. \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$2) y = x_1 \wedge x_2; \rightarrow \text{Pro}(y = 1) = P = p_1 \cdot p_2. \quad (1.17.1)$$

$$y = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3; \text{Pro}(y = 1) = P = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad (1.17.2)$$

$$3) y = x_1 \vee x_2 \cdot x_3 = x_1 \vee z_1; \rightarrow P = p_1 + p_2 \cdot p_3 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3. \quad (1.18)$$

$$4) y = (x_1 \vee x_2) \cdot x_3 = z_1 \cdot x_3. \rightarrow P = p_1 \cdot p_3 + p_2 \cdot p_3 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3. \quad (1.19.1)$$

$$5) y = x_1 \vee x_2 \vee x_3 = P = p_1 + p_2 + p_3 - p_1 \cdot p_2 - p_1 \cdot p_3 - p_2 \cdot p_3 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad (1.19.2)$$

Вероятности  $p_i$  предпосылок происшествия находят статистически, что наиболее достоверно, но, как правило, на практике это трудно достижимо.

Вероятностные меры также рассчитывают на основании построения и применения следующих моделей.

1) Гипотетических моделей о распределении случайных параметров воздействия и восприимчивости (с использованием модели превышения воздействия над восприимчивостью).

2) Теоретических моделей с рассмотрением интенсивностей предпосылок происшествия, простейшей и часто применяемой из которых является экспоненциальная зависимость вероятности возникновения предпосылки (аналог «экспоненциального закона» надежности). При этом процесс возникновения происшествий рассматривают как или квазистационарный или как эргодический процесс.

### 1.5.5. Типовые примеры построения возможностной функции происшествия

Если исходные данные о вероятности предпосылок происшествий отсутствуют, рассматриваемые системы считаются уникальными или нетиповыми.

Для элементарных логических функций, п.2, на основании правил п.1.5.3 построим следующие их возможные формы функции происшествия.

$$1) y = x_1 \vee x_2; \rightarrow \text{Pos} (y = 1) = \Pi = \max (\pi_1, \pi_2 ). \quad (1.20)$$

$$2) y = x_1 \wedge x_2; \rightarrow \text{Pos} (y = 1) = \Pi = \min (\pi_1, \pi_2 ). \quad (1.21)$$

$$3) y = x_1 \vee x_2 \wedge x_3 \rightarrow \text{Pos} (y = 1) = \Pi = \max (\pi_1, \min (\pi_2, \pi_3 )). \quad (1.22)$$

$$4) y = ( x_1 \vee x_2 ) \wedge x_3 \rightarrow \text{Pos} (y = 1) = \Pi = \min (\pi_3, \max (\pi_1, \pi_2 )). \quad (1.23)$$

Возможностные меры  $\pi_i$  предпосылок происшествия найдем на основании представления параметров воздействия  $s$  и восприимчивости  $r$ , как нечеткие величины. Например, для условия (13) получим:

$$\pi_1 = \text{Pos} (x_1 = 1) = \text{Pos} (s \geq r). \quad (1.24)$$

### 1.6. Установление меры определенности вершинного исхода на основе параметрического критерия «воздействие – больше восприимчивости»

В зависимости от точности, полноты и достоверности информации о возможных реализациях величин  $s$  и  $r$  в рассматриваемой системе «факторы – объект», мера определенности реализации вершинного исхода или условия (24) может быть представлена как мера необходимости  $n = \text{Nec} (t)$  или мера вероятности  $p = \text{Pro} (t)$  или мера возможности  $\pi = \text{Pos} (t)$ . При нормировке на интервале вещественных чисел  $[0,1]$  для одного отдельно взятого критерия эти меры находятся в следующем отношении [1]:

$$Nec(s > r) < Pro(s > r) < Pos(s > r), \quad (1.25)$$

где под  $s$ ,  $r$  соответственно понимаются: в операторе  $Nec$  - детерминированные, в операторе  $Pro$  - случайные, в операторе  $Pos$  - нечеткие величины (параметры) параметрической модели реализации вершинного исхода.

Иллюстративно соотношение мер определенности реализации исхода представлено на рисунке 1.

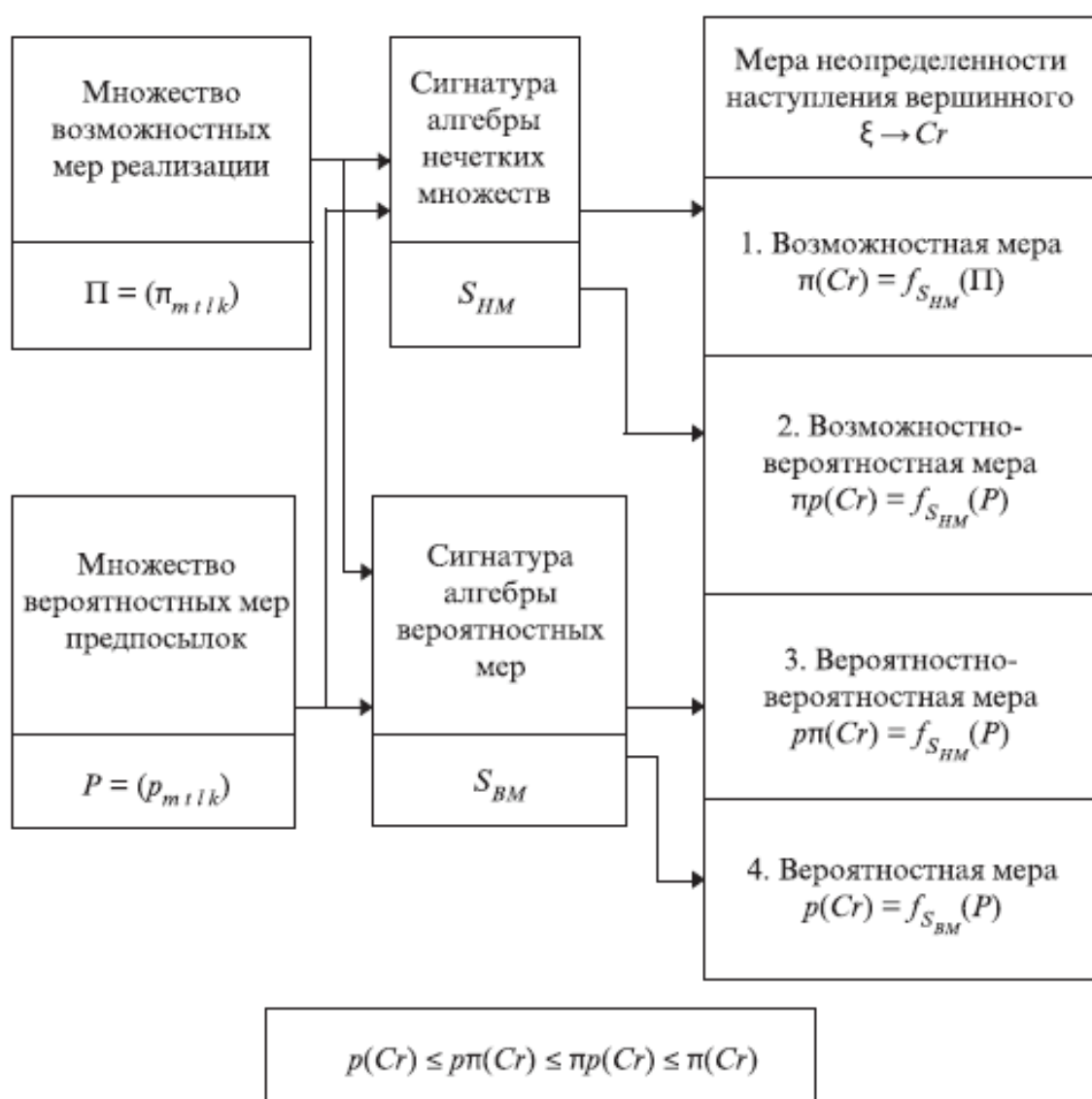


Рисунок 1.1 – Алгебра мер и соотношение вероятностной и возможностной мер реализации исходов.

Если система «факторы – объект» детерминирована, то мера принимает одно из двух значений: 0 или 1.

Если система «факторы – объект» случайна и известны плотности распределения вероятности  $\varphi(s)$  и  $\varphi(r)$  случайных величин  $s$  и  $r$ , то вероятность реализации условия ( $s \geq r$ ) находят на основании построения вероятностной параметрической модели «воздействие  $s$  – восприимчивость  $r$ » (с использованием модели превышения воздействия над восприимчивостью), рисунок 2. При этом на рисунке 2 представлены четыре основных варианта соотношения этих величин. Верхняя «линейка» демонстрирует вариант: воздействие намного меньше восприимчивости и пересечение кривых  $\varphi(s)$  и  $\varphi(r)$  невозможно, вероятность возникновения нежелательного исхода, то есть реализации происшествия, равна нулю,  $p=0$ .

Следующая «линейка ( $p>0$ )» демонстрирует вариант «приближения снизу» вероятных значений параметра воздействия  $s$  к вероятным значениям параметра восприимчивости  $r$ . Третья «линейка  $p=0.5$ » описывает случай равенства математических ожиданий воздействия  $m_s$  и восприимчивости  $m_r$ . Попутно здесь следует заметить, среднеквадратические отклонения воздействия  $s$  и восприимчивости  $r$  могут не совпадать. И наконец, нижняя линейка описывает случай, когда математическое ожидание воздействия  $m_s$  и намного больше математического ожидания восприимчивости  $m_r$  и при любых значениях среднеквадратических отклонений воздействия  $s$  и восприимчивости  $r$  пересечение кривых  $\varphi(s)$  и  $\varphi(r)$  невозможно. Рассмотренные варианты соотношения параметров воздействия и восприимчивости позволяют наглядно и ускоренно оценивать вероятность реализации параметрической предпосылки любого вершинного исхода.

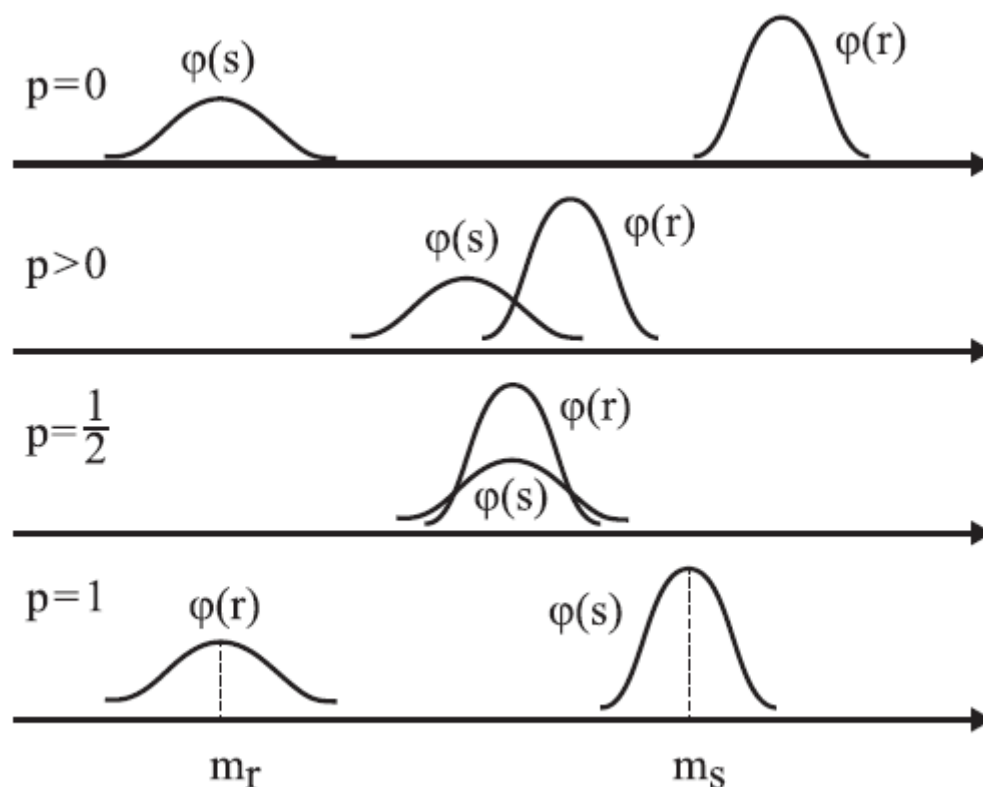


Рисунок 1.2 - Иллюстрация основных вариантов соотношения параметров воздействия и восприимчивости

Задача. На основе рассмотренной на рисунке 1.2 параметрической модели и условия превышения воздействия  $s$  над восприимчивостью  $r$  определим вероятность реализации вершинного исхода  $x = 1$  в происшествии  $\text{Pro}(x = 1) = \text{Pro}(s > r)$  следующим образом.

Вводим новую переменную  $z = s - r$ , которая также распределена по нормальному закону с математическим ожиданием  $m_z = m_s - m_r$ .

Преобразуем задачу к виду

$$\text{Pro}(s - r > 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(r) \left[ \int_{-\infty}^s \varphi(s) ds \right] dr \quad (1.26)$$

Сначала рассмотрим вариант (1):  $m_s < m_r \rightarrow m_z = m_s - m_r < 0$ , см. вторую линейку на рисунке 1.2.

Введем функцию распределения вероятности  $\varphi_z(z)$  и на основании табулированного интеграла вероятностей  $\Phi(x)$  [Корн, справочник по математике] для варианта 1 выражение (1.26) представим в виде

$$p_1(u) = \text{Pro}(z > 0) = 0.5 - \Phi((m_r - m_s) / (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{0.5}) = 0.5 - \Phi(u), \quad (1.27)$$

где параметр  $u = (m_r - m_s) / (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{0.5}$  представляет собой вероятностный «приведенный параметрический запас безопасности» (ППЗБ), как отношение разности математических ожиданий воздействия и восприимчивости к их суммарному среднеквадратическому отклонению.

Для варианта (2):  $m_s > m_r \rightarrow m_z = m_s - m_r > 0$  выражение (1.26) получим в виде

$$p_2(u) = \text{Pro}(z > 0) = 0.5 + \Phi((m_s - m_r) / (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{0.5}) = 0.5 + \Phi(u). \quad (1.28)$$

Заметим, что  $(m_s - m_r) / (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{0.5} = -(m_r - m_s) / (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{0.5} = -u$ .

Поставленную задачу решим численно. Для этого из таблицы значений интеграла вероятностей (функции Лапласа) последовательно выбираем значения приведенного параметрического запаса безопасности  $u = 0; 1; 2; 3; 4; 5$ , затем находим значения  $\Phi(x = u)$ , которые сведем в Таблицу 1. В Таблице 1 представлены результаты расчета значений вероятности реализации вершинного исхода  $\text{Pro}(s > r)$  в функции от приведенного параметрического запаса безопасности  $u$  для двух различающихся вариантов соотношений математических ожиданий воздействия и восприимчивости (1):  $(m_r > m_s)$  и (2):  $(m_s > m_r)$ . Задача решена.

Таблица 1.1 Вероятность реализации вершинного исхода  $\text{Pro}(s > r)$

$u$	$p_1(u)   (m_r > m_s)$	$p_2(u)   (m_s > m_r)$
0	0.5	0.5
1	0.15866	0.84134
2	0.02275	0.97725
3	0.00145	0.99865
4	0.0000317	0.999683
5	0.0000001867	0.9999997133

На основании Таблицы 1.1 путем интерполяции легко получить численные оценки показателей безопасности на практически значимой области анализа: математическое ожидание воздействия «меньше» или «намного меньше» восприимчивости, а «разброс» значений приведенного параметрического запаса безопасности  $u \geq 1$ . Применение результатов варианта (2): воздействие «больше» или «намного больше» восприимчивости полезно для проведения прогноза системы с учетом экстремальных воздействий.

Вероятность реализации вершинного исхода может быть точно рассчитана, если известны значения характеристик (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение) плотностей распределения вероятности параметров воздействия и восприимчивости.

Однако чаще всего экспертиза безопасности проводится в условиях отсутствия точной и (или) полной информации о предпосылках возникновения происшествий в технической системе. Поскольку «параметр воздействия» – это характеристика «среды», то эксперт для его нахождения использует расчетно-аналитические способы. Тогда как «параметр восприимчивости» – выраженная в терминах и величинах параметров воздействия характеристика способности объекта (или субъекта) к



возникновению в системе происшествия (вершинного исхода). Причем параметры восприимчивости устанавливаются, как правило, экспериментально. В качестве примера под параметрами восприимчивости эксперты принимают следующие показатели:

- 1) предельно допустимая концентрация вредного газа ( $\text{г/м}^3$ ) или доза излучения ( $\text{Дж/кг}$ ) или (Рентген) или продолжительность пребывания (с) или (час);
- 2) пятидесятипроцентный критический порог воздействия (размерность по аналогии с предыдущими показателями);
- 3) среднее фибрилляционное значение тока (мА);
- 4) напряжение начала текучести материала твердого тела (Па).

Следует заметить, что, как правило, эксперт способен установить такого рода параметры воздействия и восприимчивости в виде нечетких интервалов с указанием уровня различимости.

### **1.7. Расчет возможностной меры вершинного исхода в модели «нечеткое воздействие – нечеткая восприимчивость»**

При использовании фундаментального соотношения мер определенности для некоторого события в рассматриваемой системе, оказываются достижимыми сравнение и представление результатов оценки риска уникальных систем на основе нахождения верхних границ значений вероятности происшествия (вершинного исхода) [1, 2]. Для установления возможностной меры реализации параметрических предпосылок в системе была поставлена задача об определении условий существования решения и нахождении меры реализации вершинного исхода, если параметры  $s$ ,  $r$  – нечеткие величины, ядра которых заданы, а границы их носителей установлены на уровне  $\alpha$  – среза [Дюбуа, Прад, Есипов].

Считается, что статистические данные о разбросе нечетких параметров отсутствуют, но экспертным путем установлены области для ядер нечетких

величин  $s$ ,  $r$ , обозначаемых в виде  $\bar{s} \in [0, \bar{s}_h]$ ,  $\bar{r} \in [\bar{r}_l, \bar{r}_h]$ , а также области для носителей этих величин на уровне их  $\alpha$  – среза, см. рисунок 1.3:

$$\begin{aligned} R_\alpha &= \{\lambda \mid \lambda \in X, \mu_r(\lambda) \geq \alpha : r_{\alpha l}, \bar{r}_l, \bar{r}_h\}, \\ S_\alpha &= \{\lambda \mid \lambda \in X, \mu_s(\lambda) \geq \alpha : \bar{s}_l = 0, \bar{s}_h, s_{\alpha h}\} \end{aligned} \quad (1.29)$$

Под границами  $r_{\alpha l}$ ,  $s_{\alpha h}$  носителей  $R_\alpha$ ,  $S_\alpha$  подразумеваются «ничтожно» возможные значения нечетких величин  $r$  и  $s$ , которые эксперты различают со степенью уверенности, равной  $(1 - \alpha)$ , где  $\alpha$  – уровень различимости этих границ. В рамках этой модели, для «верхней»  $\bar{s}_h$  и «нижней»  $\bar{r}_l$  границ ядер было задано условие:  $\bar{s}_h \leq \bar{r}_l$  и рассмотрена гауссова функции принадлежности  $\mu(\lambda)$ .

Если функции принадлежности параметров  $s$ ,  $r$  известны, то мера  $\pi$  может быть найдена путем решения задачи о сравнении двух нечетких интервалов.

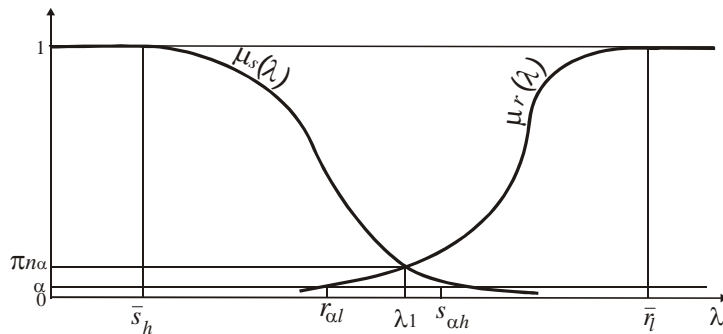


Рисунок 1.3 – Выражение модели «воздействие – восприимчивость» через функции принадлежности

Введем параметры  $\Delta_\alpha s = s_{\alpha h} - \bar{s}_h$ ,  $\Delta_\alpha r = r_{\alpha l} - \bar{r}_l$ , а также абсолютный «запас безопасности»  $zb$  и приведенный параметрический «запас безопасности»  $zb_\alpha$ :

$$zb = \bar{r}_l - \bar{s}_h, \quad zb_\alpha = \frac{zb}{\Delta_\alpha s + \Delta_\alpha r} \quad (1.30)$$

Определим возможность меру при нормальной (гауссовой) аппроксимации функций принадлежности нечетких параметров  $s$  и  $r$ :

$$\mu_s(\lambda) = e^{-\frac{(\lambda-s_h)^2}{2\sigma_s^2}}, \quad \mu_r(\lambda) = e^{-\frac{(\lambda-r_l)^2}{2\sigma_r^2}}, \quad (1.31)$$

где  $\sigma_s$  ( $\sigma_r$ ) – характеристика размытости соответственно параметров  $s$ ,  $r$ , связанная с практической областью размытости  $\Delta_s$  ( $\Delta_r$ ) соотношением:

$\Delta = k \cdot \sigma$ , где  $k$  – коэффициент нормальной размытости, которому при  $k = 3; 4; 5$  соответствует квантиль доверия  $1 - \nu$ : 0,9968; 0,999968; 0,9999997 [Есипов, Черемисин].

По определению, возможность меры превышения  $s$  над  $r$  есть значение функций принадлежности в их точке пересечения  $\lambda_1$ . Тогда, как видно из рисунка 3:

$$\pi n_\alpha = \mu_s(\lambda_1) = \mu_r(\lambda_1) \quad (1.32)$$

После подстановки (1.29) в (1.30), с учетом (1.28), получим следующую аналитическую зависимость «нормальной» аппроксимации возможностью меры:

$$\pi n_\alpha = e^{-k_e \left( \frac{\bar{r}_l - \bar{s}_h}{\Delta_\alpha s + \Delta_\alpha r} \right)^2} = e^{-k_e \cdot (zb_\alpha)^2}, \quad (1.33)$$

где  $k_e = k/2$ , а значения коэффициента  $k_e = 4,5; 8; 12,5$  соответствуют значениям коэффициента  $k = 3; 4; 5$  в функции ошибок.

Результаты численного решения зависимости (1.33) представлены на рисунке 1.5.

Очевидно, что влияние аргумента  $zb_\alpha$  на функцию  $\pi n_\alpha$  слабее, нежели влияние коэффициента  $k_e$ . При изменении  $k_e$  от 4,5 до 12,5 происходит изменение  $\pi n_\alpha$  на несколько порядков.

С практической точки зрения достаточно рассмотреть следующие области изменения аргументов:  $\alpha \in [10^{-5}, 10^{-1}]$ ,  $zb_\alpha \in [1, 2]$ .

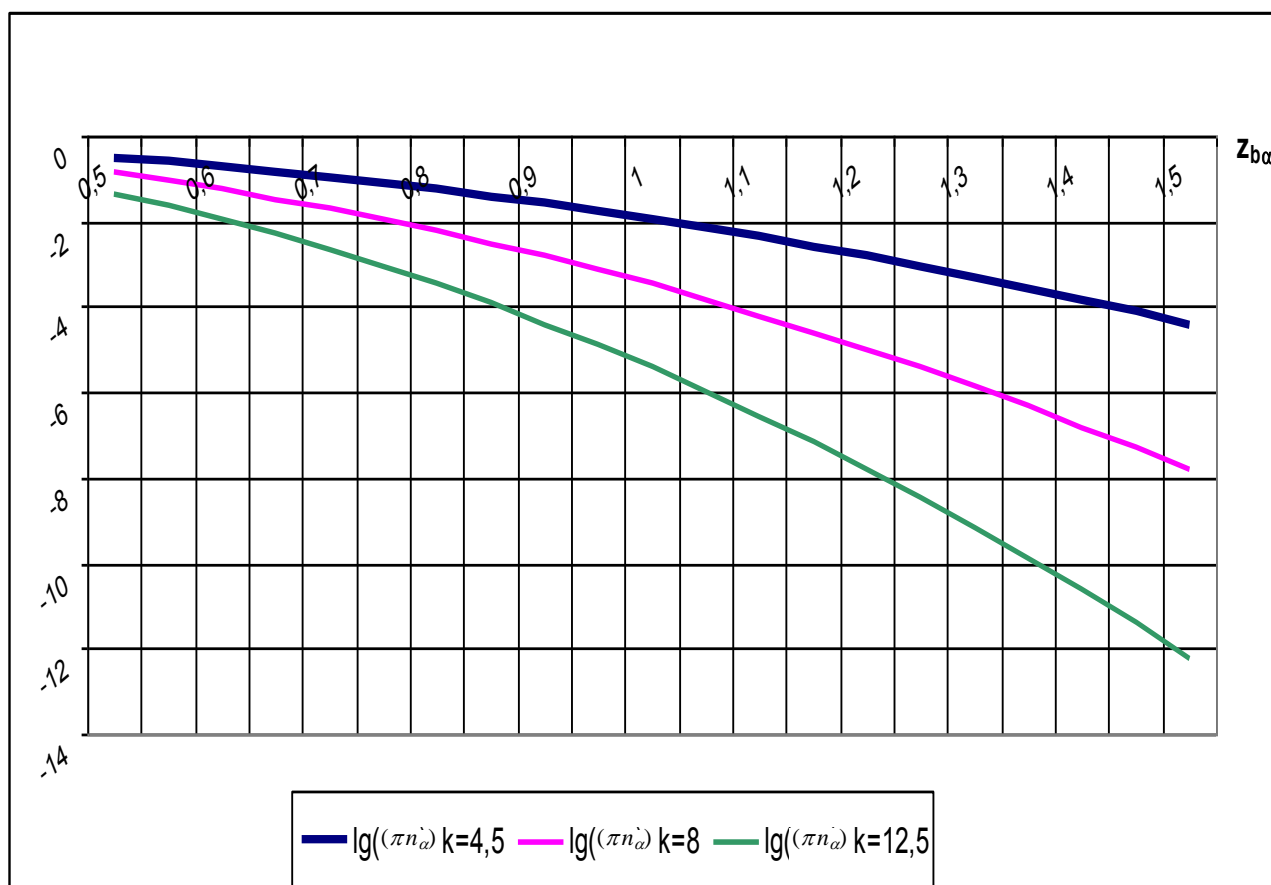


Рисунок 1. 4 – Расчетная зависимость ВМ  $\pi n_{\alpha} (k_e, z_{b\alpha})$  от приведенного запаса при нормальной аппроксимации параметров воздействия и восприимчивости

Следовательно, в модели «нечеткий параметр воздействия – нечеткий параметр восприимчивости» при гауссовой аппроксимации функций принадлежности, возможностная мера предпосылки вершинного исхода есть функция от отношения уклонения ядер к суммарной размытости носителей параметров воздействия и восприимчивости. В свою очередь, при отыскании значений меры отказа от 0,03 и ниже большое значение приобретает как анализ краевых условий задачи, так и анализ их влияния на результат ее решения. Применительно к сложным системам, у которых произведение количества элементов на количество связей между ними превышает число 100, такое «огрубление» требований к представлению нечетких величин,

например, только по уровню  $\alpha$  – среза, и к оперированию с ними в рамках сигнатуры нечетких множеств, дает практические преимущества. Причем главным из преимуществ является получение конечного результата при даже малом наборе исходных данных, имеющем место из-за стоимостных и (или) временных ограничений на получение и преобразование информации [1,4].

В первом приближении, при допущении о линейной аппроксимации нечетких параметров (в наименее информативном варианте их получения) справедлива зависимость [1,4]:

$$\pi^L_i = 1 - \bar{z}b, \quad (1.34)$$

где, см. формулу (1.30),  $\bar{z}b$  – приведенный параметрический запас безопасности:

$$\bar{z}b = (\bar{r} - \bar{s}) / (\Delta_r + \Delta_s), \quad (1.35)$$

в котором  $\bar{r}$  и  $\bar{s}$  – соответственно, «ядра» нечетких параметров восприимчивости  $r$  и воздействия  $s$ ; а  $\Delta_r$  и  $\Delta_s$  – «интервалы размытости» нечетких параметров восприимчивости  $r$  и воздействия  $s$ , см. рисунок 6.

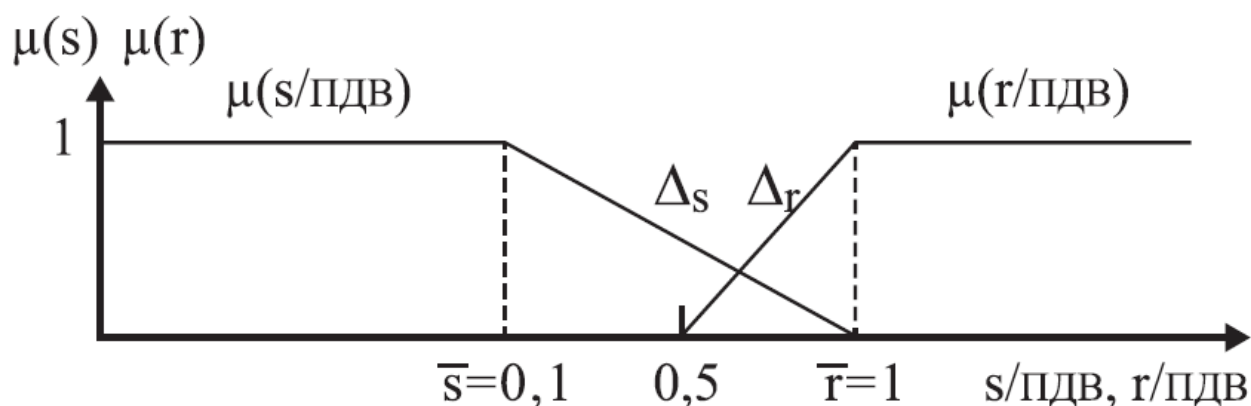


Рисунок 1.5 - Линейная аппроксимация функций принадлежности воздействия и восприимчивости  $\mu(s)$  и  $\mu(r)$

Опишем введенные на рисунке 1.5 обозначения:  $\bar{r}$ ,  $\bar{s}$  и  $\Delta_r$ ,  $\Delta_s$  соответственно – ядра и нечеткие интервалы параметров  $s$ ,  $r$ ;  $\mu(s=s/\text{ПДВ})$  и

$\mu(r=r/\text{ПДВ})$  соответственно функции принадлежности нечетких нормированных параметров воздействия  $s/\text{ПДВ}$  и восприимчивости  $r/\text{ПДВ}$ , где величина ПДВ обобщенно представляет предельную допустимую восприимчивость человека к действию фактора любой природы, например ПДК, как характеристика чувствительности человека к действию отравляющих газов. По аналогии с рисунком 1.2, рисунок 1.5 применяют для иллюстрации основных вариантов соотношения параметров воздействия и восприимчивости, а вместе с зависимостями (1.34, 1.35) применяют для ускоренной экспресс оценки показателей безопасности системы.

## 1.8. Расчет возможностной меры по параметрическому запасу безопасности

В большинстве задач оценки безопасности систем приведенный параметрический запас безопасности может варьировать в пределах от  $-2,0$  до  $+2,0$ . При этом рассматривается линейная и нормальная (гауссова) аппроксимация параметров воздействия и восприимчивости. При этом необходимо сопоставлять значения возможностной меры с гипотетически точной вероятностной мерой возникновения происшествия. Результаты расчета значений этих мер на основании зависимостей (1.26, 1.28, 1.33) представлены в Таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Расчетные значения возможностной меры  $\text{Pos}(s \geq r)$ , при линейной ( $\pi^L_i$ ) и нормальной ( $\pi n_\alpha$ ) аппроксимациях в функции от параметрического запаса безопасности  $zb_i$

$zb_i$	0	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,5	2,0
$\pi^L_i$	1.0	0.50	0.4	0.3	0.1	0	0	0	0
$\pi n_\alpha$	1,0	0,50	0,17	0,14	0,06	0,03	0,02	0,002	$10^{-5}$

## 1.9. Изучение основных вариантов расчета вероятностной и possibilitional мер

### 1.9.1. Дизъюнктивная форма вершинного исхода

1. Дана логическая модель – дизъюнктивная форма ДФ ВИ, (см. ф-лу 4):

$$y = z_1 \vee z_2 \vee z_3,$$

где промежуточные переменные

$$z_1 = x_1 \wedge x_2; z_2 = x_3 \wedge x_4; z_3 = x_5 \wedge x_6 \wedge x_7.$$

По правилам преобразования (п.1.5.2 и п.1.5.4) получим следующую вероятностную функцию реализации вершинного исхода:

$$y = z_1 \vee z_2 \vee z_3 \rightarrow P = p_1 + p_2 + p_3 - p_1 p_2 - p_1 p_3 - p_2 p_3 + p_1 p_2 p_3, \quad (1.36)$$

где  $p_1 = a_1 \wedge a_2$ ;  $p_2 = a_3 \wedge a_4$ ;  $p_3 = a_5 \wedge a_6 \wedge a_7$ ,  $a_i = \text{Pro}(z_i = 1)$ .

По правилам преобразования (п.1.5.3 и п.1.5.5) possibilitional функцию реализации вершинного исхода получим в следующем виде:

$$\begin{aligned} y = z_1 \vee z_2 \vee z_3 \rightarrow \text{Pos}(y = 1) &= \Pi = \max(\pi_{z_1}, \pi_{z_2}, \pi_{z_3}) = \\ &= \max\{\min(\pi_1, \pi_2), \min(\pi_4, \pi_3), \min(\pi_5, \pi_6, \pi_7)\}. \end{aligned} \quad (1.37)$$

Значения нечетких мер  $\pi_1 \dots \pi_7$  определяют или статистически, или с использованием параметрической модели, по зависимостям (22 – 25), а также с помощью рисунка 4.

### 1.9.2. Конъюнктивная форма вершинного исхода

Дана логическая модель – конъюнктивная форма КФ ВИ, (см. зависимость 6):

$$y = z_1 \wedge z_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge x_7,$$

где промежуточные переменные  $z_1 = x_1 \vee x_2$ ,  $z_2 = x_5 \vee x_6$ .

По правилам преобразования (п.1.5.2 и п.1.5.4) получим следующую вероятностную функцию реализации вершинного исхода

$$P = pz_1 \cdot pz_2 \cdot pz_3 \cdot pz_4 \cdot pz_7 ,$$

$$pz_1 = p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2 ; pz_2 = p_5 + p_6 - p_5 \cdot p_6 , \text{ где } p_i = \text{Pro} (x_i = 1). \quad (1.38)$$

По правилам преобразования (п.1.5.3 и п.1.5.5) получим, что  
возможностная функция реализации вершинного исхода:

$$\text{Pos}(y=1)=P=\min(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5)=\min(\max(\pi_1, \pi_2), \max(\pi_5, \pi_6), \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (1.39)$$

Значения нечетких мер  $\pi_1 \dots \pi_7$  определяют статистическими методами или с использованием параметрической модели, по зависимостям (1.26 – 1.35) или с помощью рисунка 4.

### 1.9.3. Расчет мер определенности ВИ по значениям приведенного параметрического запаса безопасности

Дана следующая логическая модель ВИ:

$$y = x_1 \vee x_2 \wedge x_3 . \quad (1.40)$$

По значениям приведенного параметрического запаса  $zb_i$  реализации переменных  $x_i$ , см. таблицу 4, рассчитать вероятностную и возможностную меры реализации вершинного исхода  $y = 1$  в рамках линейной и гауссовой аппроксимации параметров воздействия и восприимчивости.

Таблица 1.3 - Исходные данные и результаты расчета мер определенности реализации функции  $y = x_1 \vee x_2 \wedge x_3 = 1$  и её аргументов  $\text{Pro} (zb_i)$  и  $\text{Pos} (zb_i)$

1(2)

	$zb_i$	$\text{Pro} (zb_i) = p_{1i}$	$\text{Pos} (zb_i)_{1=\pi_1}$	$\text{Pos} (zb_i)_{2=\pi_2}$
1	0,5	0,25	0,50	0,50
2	0,9	0,10	0,06	0,10
3	1.2	0,05	0,02	0,0



Решение.

Преобразуем логическую модель в следующие вероятностную и возможностьную функции реализации происшествия:

$$y = x_1 \vee x_2 \wedge x_3 ; \rightarrow \text{Pro} (y = 1) = P = (p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2) \cdot p_3 \quad (1.41)$$

$$y = x_1 \vee x_2 \wedge x_3 \rightarrow \text{Pos} (y = 1) = \Pi = \max (\pi_1, \min (\pi_2, \pi_3 )) \quad (1.42)$$

Подставим значения вероятности и возможности реализации предпосылок в формулы (1.41 и 1.42) и получим итоговые значения вероятностной и возможностьной мер происшествия в следующем виде:

$$\text{Pro} (y = 1) = P = (0,5+0,1 - 0,05) \cdot 0,05 = 0,0275.$$

$$\text{Pos} (y = 1) = \Pi = \max (0,5; \min (0,06; 0,02)) = 0,5.$$

Следует заметить, что рамках такого подхода значение возможностьной меры вершинного исхода определяют с ошибками первого и второго рода, которые представляют собой вероятности ложного и необнаруженного происшествия.

## Выводы к разделу 1

1. Выполнен анализ и систематизированы основные способы расчета показателей безопасности и (или) риска системы на основе вероятности или возможности как «объективной» или как «субъективной» мер.
2. Систематизированы элементарные логические модели, которые получают на основании анализа лингвистических моделей происшествий в конкретных системах вида «защита – объект – среда – человек».
3. Собраны правила преобразования логических моделей в вероятностную и в возможностьную (нечеткую) функции вершинных исходов и представлены типовые варианты расчета показателей системы.
4. Разработаны и иллюстрированы параметрические модели, позволяющие рассчитывать вероятностные и (или) возможностьные

меры вершинных исходов в сложной системе практически на всём диапазоне значений параметров воздействия и восприимчивости.

5. Получен и апробирован объединенный вариант расчета мер вероятности и возможности по приведенному параметрическому запасу безопасности системы с использованием дополнительной функции ошибок и полученных аналитической и расчетной зависимостей возможностной функции вершинных исходов.

### **Список литературы к разделу 1.**

1. Есипов Ю.В., Самсонов Ф.А., Черемисин А.И. Мониторинг и оценка риска систем «защита – объект – среда». М.: Изд. ЛКИ – УРСС. 3 изд., 2013. 138 с.
2. Н. А. Махутов, Д. О. Резников, В. П. Петров, В. И. Куксова Нормативные подходы к обеспечению защищенности критически важных объектов / Безопасность в техносфере, № 4 (июль–август), 2011, с. 5-12
3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
4. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике – М.: Мир, 1989, - 286 с.
5. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1964. 508 с.
6. Рябинин И. А. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
7. Савельев Л. Я. Комбинаторика и вероятность. Новосибирск.: Наука, СО, 1975. 420 с.
8. Востоков В.Ю. 15 лекций по анализу риска чрезвычайных ситуаций: учебное пособие. - М.: МФТИ, 2010. - 289 с.
9. Рябинин И.А., Черкесов Г.М. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М., Радио и связь. 1981. 263 с.

- 10.Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков. 2-е изд., испр. - М.: 2008. - 368 с.
- 11.Есипов Ю.В., Лапсарь А.П. Разработка метода системного анализа потенциальной опасности комплекса «технический объект – нерегламентированные факторы окружающей среды» // Надежность и контроль качества. М.: №11. 1997
- 12.Есипов Ю.В. Постановка и пути решения проблемы оценки риска сложных техногенных систем // Управление риском. М.: №1, 2003
- 13.Есипов Ю.В., Горшкова Ю.В., Шишкин Р.И. Моделирование и визуализация зон риска системы на основе критерия «воздействие – восприимчивость» // Вестник Южного научного центра. 2010. Т.6., в.3, с. 21-28.
- 14.Ю.В. Есипов Задача нахождения возможностной меры аварии в уникальной техногенной системе // Проблемы машиностроения и автоматизации, (2003), 1, 40-44
- 15.Есипов Ю.В. Концепция возможностной оценки риска техногенных систем // Автоматика и Телемеханика. № 7. 2003. С. 5 – 12
- 16.А.Г. Федорец О нормативном регулировании и стандартизации в охране труда / Безопасность труда. Безопасность в техносфере, № 4 (июль–август), 2011. С. 24-30
- 17.Есипов Ю.В. Метод возможностной (нечеткой) оценки риска сложных технических систем (глава 6 в монографии) / Безопасность России. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. /Воробьев Ю.Л., Лаверов Н.П., Махутов Н.А., Осипов В.И., Фалеев М.И., Фролов К.В., Шойгу С.К. Ч.1-2. МГФ «Знание». 2006. с.278-291. ISBN 5-87633-074-4.
- 18.Муравьева Е.В., Романовский В.Л. Прикладная техносферная рискология. Экологические аспекты .- Казань, 2007. 355 с.
- 19.Шоломицкий А.Г. Теория риска. Выбор при неопределённости и моделирование риска. М.: Издательский дом ГУ ВШЭ, 2005. 400 с.

- 20.Аминов А.Е. Рискология. М.: Финпром, 2006. 280 с.
- 21.Буянов В.П., Кирсанов К.А., Михайлов Л.А. Управление рисками (рискология) / Учебное пособие. Второе издание, исправленное и дополненное. М.: Издательство «Экзамен», 2002. 384 с.
- 22.Перепелица В.А., Попова Е.В. Математические модели и методы оценки рисков экономических, социальных и аграрных процессов. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского государственного университета, 2002. 202 с.
- 23.Винтизенко И.Г., Черкасов А.А. Роль неопределённости и риска в современной экономике // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного универ. [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, № 64 (10) 2010 года.

## **2. Расчет показателей безопасности и риска конкретных технических систем**

### **2.1. Химико-физический анализ и оценка возможности пожара в системе «котельная – факторы – защита – работники»**

Анализ условий горения газовой смеси в составе пропана в котельной выполним следующим образом.

Известно, что химическая формула пропана -  $C_3H_8$ .

Для 1кг пропана и воздуха называемая как тепловыделяющая смесь (ТВС), химическая реакция горения имеет следующий вид:



Как видно из формулы (2.1), объем горючей смеси составляет  $24,8 \text{ м}^3$ , а продуктов сгорания  $25,8 \text{ м}^3$ .

Известно, что скорость распространения фронта горения ТВС находится в пределах от 0,3 до 500 м/с.

Опишем условия горения газовой смеси в котельной на примере пропана.

*Первое условие.* Пропан, в отличие от конденсированных ВВ (тротила), может гореть только в присутствии окислителя. Окислителем является кислород, содержащийся в воздухе. Причем горение пропана возможно только при его концентрации в воздухе, находящемся в пределах от 2 до 9,5 % объёмных долей. Эти пределы называют нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ) и верхним концентрационным пределом воспламенения (ВКПВ) [1].

Выразим это условие повышения за время  $\tau$  концентрации  $n(\tau)$  газа в объеме котельной при его несанкционированном травлении на газовой магистрали и превышения нижнего концентрационного предела воспламенения с помощью логической зависимости  $y_1$

$$y_1 = 1 \rightarrow n(\tau) \geq \text{НКПВ}. \quad (2.2)$$

*Второе условие.* Наличие инициатора воспламенения (источника огня) или искры от коммутации элементов (выключателей, коммутаторов и т.д.) электрических сетей. Следует отметить, что чаще всего (с субъективной уверенностью 0.95) только каждый двадцатый применяемый элемент снабжен устройством искрогашения.

Условие появления электрической искры при коммутации в электрической сети представим следующей логической функцией от логических аргументов

$$y_2 = x_1 \cdot x_2 = 1, \quad (2.3)$$

где: реализация контактной коммутации фазного напряжения опишем условием -  $x_1 = 1$ . Например, это условие означает включение осветительной лампы настенным выключателем. При этом, если это событие не происходит, то оно формально описывается условием:  $x_1 = 0$ .

Наличие или отсутствие средства гашения искры в выключателях вообще описывается соответственно значениями логических переменных:

$$x_2 = 0 \text{ и } x_2 = 1. \quad (2.4)$$

При условии, что основной элемент системы защиты от пожара это сенсор (датчик концентрации) пропана, с помощью которого регистрируют

текущую концентрацию  $n(\tau)$  пропана на объекте, тогда условие не обнаружения сенсором факта травления газа за время  $\tau_1$  представим в виде:

$$y_3 = 1 \rightarrow \tau \geq \tau_1. \quad (2.5)$$

Условие моделирования утечки (травления) газа со скоростью  $v$  (г/с) в котельную с объемом  $V$  (м<sup>3</sup>) и образование «текущей» концентрации ТВС запишем в виде:

$$n(\tau) = v \cdot \tau / V \text{ (г} \cdot \text{моль / м}^3\text{)}. \quad (2.6)$$

Таким образом, с учетом наличия защиты логическая модель (ЛМ) наступления вершинного исхода (ВИ): «несанкционированное горение ТВС и пожар на объекте» получена в следующем виде:

$$Y = y_1 \cdot y_2 \cdot y_3. \quad (2.7)$$

Преобразуем эту логическую модель в возможность (нечеткую) функцию возникновения происшествия – пожара в котельной следующего вида:

$$\text{Pos} (Y = 1) = \min (\pi_1, \pi_2, \pi_3), \quad (2.8)$$

где  $\pi_1 = \text{Pos} (y_1 = 1) = \min (\pi_{x_1}, \pi_{x_2})$ ,  $\pi_{x_1} = \text{Pos} (x_1 = 1)$ ,  $\pi_{x_2} = \text{Pos} (x_2 = 0)$ ,

$\pi_2 = \text{Pos} (y_2 = 1) = \text{Pos} (n(\tau) \geq \text{НКПВ})$ ,  $\pi_3 = \text{Pos} (y_3 = 1) = \text{Pos} (\tau \geq \tau_1)$ .

Таким образом, построена логическая функция вершинного исхода: несанкционированное горение пропан воздушной смеси при условии травления пропана. В общем виде получено выражение для расчета возможностной меры пожара на объекте.

## 2.2 Оценка возможностной меры пожара при условии травления пропана

В дополнение условиям задачи (п.2.1) предположим, что скорость  $v$  травления составляет  $1,0 \pm 0,1$  (г·моль /с). В помещении с объемом 100 м<sup>3</sup> концентрация ГВС растет линейно по зависимости:

$$n(\tau) = (0.01 \pm 0.001) \cdot \tau \text{ (г} \cdot \text{моль / м}^3\text{)}.$$

Учитывая, что НКПВ = 2 г · моль /м<sup>3</sup>, то время достижения «приблизленно равновесного значения» этой концентрации в помещении составит  $\tau = 200 \pm 2$  секунд.

Для расчета возможностной меры используем её линейную аппроксимацию, которую представим в следующем виде:

$$\pi^L_i = 1 - \bar{z}b, \quad (2.9)$$

$$\bar{z}b = (\bar{r} - \bar{s})/(\Delta_r + \Delta_s). \quad (2.10)$$

Подставим в формулу (2.10) следующие значения параметров (г·моль/м<sup>3</sup>):

$$\bar{r} = 2, \quad \bar{s} = n(\tau), \quad \Delta_r = 0.2, \quad (2.11)$$

$$\Delta_s = 0.01\gamma \times n(\tau)^B, \quad (2.12)$$

где :  $\gamma$  – класс точности датчика, выраженный в (%),

$n(\tau)^B$  – предел шкалы измерения концентрации данного измерительного прибора.

Примем, что класс точности датчика пропана равен 10 (что соответствует практике пространственных измерений газа). При этом выберем следующий предел шкалы измерения концентрации пропана  $n(\tau)^B = 5$  (г · моль /м<sup>3</sup>).

Тогда с учетом формулы (2.12) получим, что  $\Delta_s = 0.5$  г · моль /м<sup>3</sup>.

В моменты времени с начала процесса травления  $\tau = 0, 100, 200, 300$  секунд измеренное значение концентрации пропана соответственно равно:  
 $s = n(\tau) = 0, 1, 2, 3$  (г · моль /м<sup>3</sup>).

Подставляя полученные данные в формулы (2.9) и (2.10) получим таблицу расчетных значений приведенного запаса безопасности  $\bar{z}b$  и возможностной меры  $\pi^L$  возникновения пожара в котельной, таблица 2.1.

Таблица 2.1 - Мера определенности возникновения и развития горения в котельной во времени развития процесса травления без его остановки в условиях его не обнаружения.

τ, сек	0	100	130	150	180	200
$\bar{z}_b$ запас безопасности	3	1.4	1	0.7	0.3	0
$\pi^L$ возможностная мера, Линейная аппроксимация нечетких параметров	0	0	0	0.3	0.7	1
$\pi^G$ возможностная мера, гауссова аппроксимация нечетких параметров	0	0	0,11	0,31	0,871	0,991

Выводы по результатам решения задач в п.2.1 и п.2.2.

На основании проведенного анализа типовых сценариев возможных аварий на производственной составляющей – система газоснабжения котельной, можно сделать вывод, что наиболее опасным является следующий сценарий (С2): разрыв разводящего газового коллектора → истечение природного газа → образование газозелдушной смеси в закрытом пространстве главного корпуса котельной → источник пламени → объемный взрыв → термическое поражение людей, разрушение избыточным давлением теплотехнического оборудования и сооружения главного корпуса котельной → поражение населения близлежащих улиц вторичными поражающими факторами.

Наиболее оптимальным вариантом для предотвращения развития данного сценария является установка системы мониторинга утечки газа на основе комбинации резистивных полупроводниковых, сегнетоэлектрических и оптических волноводных сенсоров пропан бутановой смеси (газовых сенсоров).



### **2.3. Разработка логической и факторной параметрической модели вершинного исхода: «воспламенение и пожар в зале посетителей» бара**

Исходные условия, принимаемые при моделировании вершинного исхода: «воспламенение и пожар в зале посетителей» бара, были следующие:

- 1) установлена система сигнализации, первичные и коллективные средства пожаротушения.
- 2) выявлены и были пресечены следующие предпосылки пожара, которые имели место за весь период функционирования объекта. При этом посетители заносили:
  - а) флаконы и баллончики с пожароопасными смесями и распылителями;
  - б) файеры и устройства для создания «холодного фейерверка».
- 3) в помещении имеют место твердые горючие материалы.
- 4) по требованиям пожарной безопасности зал был отнесен к категории 2 ( $q \geq q_1 = 1400 \text{ Вт/м}^{-2}$ ).
- 5) замечали случаи образование искры и открытого огня от зажигалки посетителей.
- 6) отмечалось или отсутствие, или сбой в работе системы пожарной сигнализации.

Эти предпосылки и результаты их логического и факторного параметрического моделирования сведены в Таблицу 2.2.

Лингвистическая модель события: «воспламенение и пожар в зале посетителей» включает полное описание возможных горючих материалов, окислителя и источников инициирования в конкретном объекте. Эти предпосылки представлены в столбце 1 Таблицы 2.2.

Согласно методу ЛВ оценки [4] в столбце 2 выписаны построенные логические модели, переменные, а также условие описание предпосылки по значению.

Тогда логическая модель вершинного исхода, учитывающая два варианта образования искры ( $x_2 = 1$ ) и ( $x_{3i} = 1$ ), а также совместное и (или) временное проявление предпосылок 1, 2, 5 и 6 имеет вид:

$$Y = y_1 \wedge (x_2 \vee x_3) \wedge y_2 \wedge x_5 \wedge x_6 \quad (2.13)$$

Преобразуем ЛМ вершинного исхода в возможность (нечеткую) функцию (ВФ) возникновения происшествия – пожара и получим следующую зависимость:

$$\text{Pos}(Y = 1) = \min \{ \text{Pos}(y_1 = 1), \pi_2, \pi_5, \pi_6, \max(\pi_2, \pi_{31}, \pi_{32}) \}, \quad (2.14)$$

где зависимости для возможностей мер предпосылок даны в последнем столбце Таблицы 2.2.

До проведения расчетов по зависимости (2.14) эксперт анализирует имеющиеся данные о статистике предпосылок (столбец 4), которые ведет специалист по безопасности и охране труда для уточнения и (или) заполнения Паспорта безопасности бара-пивоварни.

Поскольку данные обновляются не чаще, чем раз за один год, а анализируемую систему классифицируют как «нетиповую», то расчеты мер определенности реализации предпосылок удастся провести, используя только формулу (2.14). При этом были приняты следующие дополнительные уточнения и допущения в значениях параметров.

Предпосылки 1, 2, 3 анализировались на основе статистических данных. Для анализа предпосылки 4 потребовалось построение и обоснование ФП модели «воздействие – ослабление – восприимчивость». Анализ предпосылок 5 и 6, как и расчет ВМ, был основан на экспоненциальной зависимости надежности функционирования систем сигнализации и тушения. При этом способом «по аналогии» были взяты следующие значения интенсивности отказов:  $\lambda_5 = 2 \cdot 10^{-6}$  и  $\lambda_6 = 10^{-5}$  (ч<sup>-1</sup>). Продолжительность функционирования систем была взята равной 2 годам, что составляет  $t_1 = 17520$  час.

$$p_5^* = 0.19, p_6^* = 0.035.$$

Полученные результаты расчета были сведены в Таблицу 3 и подставлены в зависимость (2.15).

$$\begin{aligned} \text{Pos}(Y = 1) = \min \{ \text{Pos}(y_1 = 1), \Pi_2, \pi_5, \pi_6, \max(\pi_2, \pi_{31}, \pi_{32}) \} = \\ \min \{ 0.03, 0.002, 0.19, 0.035, 0.01 \} = 0.002. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Таблица 2.2 Результаты логического и факторного параметрического моделирования предпосылок, установленных статистических данных об их реализации, а также сводка формул для расчета возможностных мер предпосылок

№ п/п	Предпосылка	Логические функции и переменные, и условие описание предпосылки по значению	Факторная параметрическая модель	Статистическая частота	Возможностная мера
1	Наличие $(x=1)$ и несанкционированный занос $(f=1)$ 1) горючих материалов, 2) аэрозольных флаконов, 3) баллонов	$y_1 = (f \cdot x)_{11} \vee (f \cdot x)_{12} \vee (f \cdot x)_{13},$ $(x_{1i} = 1)$ $(f_{1i} = 1)$		$p_{11}^*$ $p_{12}^*$ $p_{13}^*$	$\text{Pos}(f \cdot x)_{11} = \min(\pi_{11}^f, \pi_{11}^x);$ $\text{Pos}(f \cdot x)_{12} = \min(\pi_{12}^f, \pi_{12}^x);$ $\text{Pos}(f \cdot x)_{13} = \min(\pi_{13}^f, \pi_{13}^x);$ $\pi_{11}^f = \text{Pos}(f_{11} = 1),$ $\pi_{11}^x = \text{Pos}(x_{11} = 1).$
2	поджог фейерверка	$x_2$ $(x_2 = 1)$		$p_2^*$	$\pi_2 = \text{Pos}(x_2 = 1)$
3	искра или открытый огонь	$x_{31} \vee x_{32}$ $(x_{3i} = 1)$		$p_{31}^*$ $p_{32}^*$	$\pi_{31} = \text{Pos}(x_{31} = 1)$ $\pi_{32} = \text{Pos}(x_{32} = 1)$
4	наличие в зале горючего оборудования и материалов	$y_2 = x_{41} \vee x_{42},$ $(x_{4i} = 1)$	$q_{2i} \geq q_{2i}^n$ (Вт/м <sup>2</sup> ) $T_{2i} \geq T_{2i}^n$ (°C)	$p_{41}^*$ $p_{42}^*$	$\Pi_2 = \min\{\text{Pos}(q_{2i} \geq q_{2i}^n),$ $\text{Pos}(T_{2i} \geq T_{2i}^n)\}$
5	не работает система пожарной сигнализации	$x_5$ $(x_5 = 1)$		$p_5^*$	$\pi_5 = \text{Pos}(x_5 = 1) \geq \exp(-\lambda_5 \cdot t_1)$
6	не работает система тушения пожара	$x_6$ $(x_6 = 1)$		$p_6^*$	$\pi_6 = \text{Pos}(x_6 = 1) \geq \exp(-\lambda_6 \cdot t_1)$

Таблица 2.3 - Результаты расчета вероятности, частоты и возможностной меры предпосылок для ВИ: «воспламенение и пожар в зале посетителей»

№	Предпосылка	Возможностная мера	Статистическая частота
1	Наличие $(x=1)$ и несанкционированный занос $(f=1)$ : 1) горючих материалов, 2) аэрозольных флаконов и 3) баллонов	$\text{Pos}(f \cdot x)_{11} = \min(\pi_{11}^f, \pi_{11}^x);$ $\text{Pos}(f \cdot x)_{12} = \min(\pi_{12}^f, \pi_{12}^x);$ $\text{Pos}(f \cdot x)_{13} = \min(\pi_{13}^f, \pi_{13}^x);$ $\pi_{11}^f = \text{Pos}(f_{11} = 1),$ $\pi_{11}^x = \text{Pos}(x_{11} = 1).$	$p_{11}^* = 0.02$ $p_{12}^* = 0.03$ $p_{13}^* = 0.01$
2	поджог фейерверка	$\pi_2 = \text{Pos}(x_2 = 1)$	$p_2^* = 0.002$
3	искра или открытый огонь	$\pi_{31} = \text{Pos}(x_{31} = 1)$ $\pi_{32} = \text{Pos}(x_{32} = 1)$	$p_{31}^* = 0.01$ $p_{32}^* = 0.005$
4	наличие в зале горючего оборудования и материалов	$\Pi_2 = \min\{\text{Pos}(q_{2i} \geq q_{2i}^n),$ $\text{Pos}(T_{2i} \geq T_{2i}^n)\}$	$p_{41}^* = 0.1$ $p_{42}^* = 0.01$
5	не работает система пожарной сигнализации	$\pi_5 = \text{Pos}(x_5 = 1) \geq \exp(-\lambda_5 \cdot t_1)$	$p_5^* = 0.19$
6	не работает система тушения пожара	$\pi_6 = \text{Pos}(x_6 = 1) \geq \exp(-\lambda_6 \cdot t_1)$	$p_6^* = 0.035$

Поскольку не учитывались защитные меры по сигнализации, а анализировался период – 1 год, то расчетное физическое выражение

показателя риска согласно зависимости (2.15) составило  $R = 0.002$  (пожаров/год).

## **2.4. Разработка предложений и способов повышения пожарной безопасности конкретного объекта**

На основании полученных расчетных результатов, формулы (2.14 – 2.15) инженер по технической и пожарной безопасности выявил и предложил способы дополнительного снижения вероятности реализации предпосылки 4 и 5, как определяющие основной вклад в образование вершинного исхода: пожара в зале.

Предпосылка 3. Несанкционированное создание в зале искры или открытого огня.

Предпосылка 4. Наличие в зале горючего материала, оборудования и материалов.

Предпосылка 5. Не работает система пожарной сигнализации.

Оценка потенциального уровня пожарного риска с применением системы раннего обнаружения предпосылок пожара

Произведем оценку значения вероятности возникновения пожара  $Q_{\Pi}$  на конкретно взятом объекте, в состав которого предварительно установлена и непрерывно функционирует измерительная информационная система раннего обнаружения предпосылок пожара (СРОПП) на основе трёх разнородных каналов слежения: сегнетоэлектрических сенсоров видимого и инфракрасного оптического излучения и химического (стехиометрического) состава горючих веществ. Основной функцией СРОПП является обнаружение образования открытого огня и (или) утечки и травления горючих газов в помещениях бара-пивоварни.

Рассматриваются технические предложения по системе раннего обнаружения предпосылок пожара на основе пожарных сенсоров

следующего вида: сегнетоэлектрического сенсора теплового  $D_1$  излучения, инфракрасного оптического  $D_2$  излучения и химического (стехиометрического) состава  $D_3$ .

Согласно теории принятия решений [1,4] по результатам измерений можно представить вероятностную лаконичную форму четырёх альтернативных исходов, удовлетворяющей условию полной группы несовместных исходов:

$$\text{Вер(ПО)} + \text{Вер(ПНО)} + \text{Вер(Ош 1 рода)} + \text{Вер(Ош 2 рода)} = 1 \quad (2.16)$$

где  $\text{Вер}(\cdot)$  – оператор вероятности, ПО – правильное обнаружение, то есть реальное наличие предпосылок пожара (горючее и окислитель), ПНО – правильное не обнаружение, то есть отсутствие предпосылок пожара, Ош 1 рода – ошибка первого рода: ложное обнаружение предпосылок пожара, которые совместно отсутствуют, Ош 2 рода – ошибка второго рода: не обнаружение совместного появления предпосылок пожара.

Вводя широко применяемые для этих слагаемых обозначения  $\text{Вер(ПО)} = p$ ,  $\text{Вер(ПНО)} = q$ ,  $\text{Вер(Ош 1 рода)} = \alpha$ ,  $\text{Вер(Ош 2 рода)} = \beta$ , зависимость (2.16) представим в виде:

$$p + q + \alpha + \beta = 1. \quad (2.17)$$

С позиции обеспечения жестких требований к системам пожарной безопасности [2] чаще всего применяют такие частные показатели как  $p$  –  $\text{Вер(ПО)}$  и  $\alpha$  –  $\text{Вер(Ош 1 рода)}$ .

В качестве требований к разработке системы раннего обнаружения предпосылок пожара были приняты следующие положения.

Положение 1. Достоверное обнаружение (ДО) факта пожара основано на одновременном срабатывании всех трех сенсоров.

Лингвистическое описание этого положения имеет вид:

$\text{ДО} = D_1 \text{ и } D_2 \text{ и } D_3$ .

На основе алгоритма и в терминологии Рябинина И.А. как логическую и вероятностную функции, так и условие гарантированного обнаружения

пожара с помощью трёх разнородных датчиков представим следующим образом:

$$y_3 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \rightarrow \text{Вер(ПО)} = P_3 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3, \quad (2.18)$$

где  $p_i$  - вероятность безотказной работы  $i$  сенсора,  $i = 1, 2, 3$ .

Обозначим  $q_i$  - вероятность отказа  $i$  сенсора, причем  $p_i + q_i = 1$ .

Выполним в формуле (13) подстановку  $p_i = 1 - q_i$ .

Для упрощения анализа предположим, что все сенсоры равно надежны:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q. \quad (2.19)$$

При подстановке (2.19) в (2.18) получим следующую зависимость вероятности достоверного обнаружения пожара на объекте от вероятности отказа любого датчика:

$$P_3 = 1 - 3q + 2q^2 - q^3. \quad (2.20)$$

Проверка зависимости (2.20). Пусть вероятность отказа любого датчика принимает одно из значений:  $q = 0.1$  или  $0.01$ .

Тогда получим, что  $P_3 = 0.72$  или  $0.972$ .

Положение 2. Факт срабатывания двух из трех сенсоров со степенью доверия  $\varepsilon$  принимается за ложную тревогу (ЛТ).

Так называют в теории и практике непрерывного контроля ошибку 1 рода системы обнаружения пожара.

Лингвистическое условие этого положения:

$$\text{ЛТ} = (D_1 \text{ и } D_2) \text{ или } (D_2 \text{ и } D_3) \text{ или } (D_1 \text{ и } D_3). \quad (2.21)$$

Логическая функция этого условия и результат её преобразования в вероятностную форму по Рябинину (см. п.1.5.2 и 1.5.4) имеет вид:

$$\begin{aligned} y_{\text{ЛТ}} &= x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_3 \cdot x_2 \rightarrow \\ &\rightarrow P_{\text{ЛТ}} = 1 - (1 - g_1) \cdot (1 - g_2) \cdot (1 - g_3), \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\text{где } g_1 = p_1 \cdot p_2; \quad g_2 = p_1 \cdot p_3; \quad g_3 = p_2 \cdot p_3.$$

С учетом выполнения условий (2.21) и (2.22) и, опуская промежуточные выкладки, получим формулу для вероятности ложной тревоги, выраженную как и в (2.20) через вероятность отказа



сенсоров  $q = q_1 = q_2 = q_3$ , получим:

$$\text{Вер (ЛТ)} = P_{2из3} = 1 - 3q^2 + 3q^4 - q^6. \quad (2.23)$$

При эксплуатации системы обнаружения пожара самыми важными являются выполнения двух требований:

- 1) вероятность обнаружения пожара не меньше требуемого значения  $P_3 \geq P_{тр}$ ;
- 2) вероятность ложной тревоги Вер (ЛТ) не больше заданного значения.

Выполнение первого требования означает выполнение требования Закона о Пожарной безопасности. Выполнение второго требования позволяет отсеять и снизить количество ложной информации, которая часто обуславливает эксплуатирующие и дежурные субъекты совершать трагические проступки, связанные с умышленным отключением системы СРОПП.

Произведем оценку «сверху» вероятности ложной тревоги.

При таком подходе полагают, что в выражении полной вероятности альтернативных решений (2.16) ошибка первого рода  $\alpha$  значительно больше ошибки второго рода  $\beta$ :

$$p + q + \alpha + \beta = 1 \rightarrow \alpha \gg \beta. \quad (2.24)$$

С учетом этого практически важным оказывается соотношение между Вер(ПО) и  $1 - \text{Вер(ЛТ)}$ , которое представим в виде неравенства

$$P_3 + \alpha + \varepsilon \leq P_{2из3}, \quad (2.25)$$

где  $\varepsilon$  – квантиль доверия, принимающий значения при правиле доверия «трёх сигм»:  $\varepsilon = 0.003$ ; при правиле «шести сигм»:  $\varepsilon = 0.000006$ .

Тогда с помощью последнего выражения и зависимостей (2.20), (2.23) получим:

$$\alpha + \varepsilon \leq P_{2из3} - P_3 = 3qr. \quad (2.26)$$

На области значений вероятности не обнаружения пожара или отказа  $q \leq 0.01$  при выполнении правила представления «трёх сигм» по параметрам воздействия и восприимчивости с ошибкой не более  $\varepsilon = 0.003$  можно записать:

$$\alpha < P_{\text{изз}} - P_3 = 3q(1 - q). \quad (2.27)$$

Проверка зависимости (2.27) на примере.

Пример 2. Пусть вероятность отказа любого датчика  $q = 0.01$ . Подставив это значение в формулу (2.27) получим вероятность ложного отказа  $\alpha + \varepsilon \leq 0.028$ . При этом на основании зависимости (2.20) расчетная вероятность гарантированного обнаружения пожара 0.970299.

Тогда как при учете срабатывания только одного датчика пожара вероятность обнаружения пожара равна  $\text{Pro}(y = 1) = 1 - 10^{-6}$ .

Считая, что  $\varepsilon = 0.003$ , доверительное значения вероятности ложного отказа (то есть срабатывания двух из трёх сенсоров и формирование команды «пожар на объекте») не превысит значение  $\alpha = 0.025$ . Фактически это означает, что один из сорока сигналов о пожаре от системы СРОПП может быть ложным.

Тогда при наличии системы автономного пожаротушения с тремя независимыми устройствами при вероятности их отказа  $q = 0.01$  вероятность тушения пожара находится в интервале значений от 0.999999 до 0.970299.

При этом, как видно, верхняя граница вероятности обнаружения признаков пожара достигает требуемого значения:  $(1 - 10^{-6})$ .

Таким образом, если предположить, что вероятность срабатывания установок автоматического пожаротушения равна такой же величине (0.999999), то требование достижения нормы индивидуального риска  $Q_B^H$  может быть выполнено. Это позволяет по вероятности правильного обнаружения каждым датчиком, имеющим класс точности 1 при условии реализации этих сенсоров в комбинации логического суммирования достичь требуемую вероятность пожарной безопасности на уровне  $10^{-6}$ !

## 2.5. Оценка показателей риска профессиональных заболеваний работников

Помимо патологии шумовой и вибрационной болезней наиболее частыми заболеваниями работников горного перерабатывающего предприятия являются бронхит и пневмокониоз. Бронхиты возникают при задержке крупных частиц (более 5 мкм) в верхних дыхательных путях, пневмокониозы - заболевания органов дыхания с изменением ткани - возникают в результате действия пыли размером частиц менее 5 мкм.

Поэтому для количественной оценки условий труда на предприятии по показателям индивидуального риска были выбраны следующие вершинные исходы.

ВИ-1: шумовая и вибрационная болезнь,

ВИ-2: болезни органов дыхания: бронхит и (или) пневмокониоз.

При моделировании безопасности необходимо учитывать, как наличие, так и возможное отсутствие средств коллективной и индивидуальной защиты от действия этих вредных факторов.

Для построения логической модели ВИ-1 были введены и описаны следующие параметрические условия и логические переменные.

К параметрическим условиям были отнесены следующие:

- 1) условие развития шумовой болезни в виде превышения относительной интенсивности шума  $I$ , (дБ) над санитарно-допустимым порогом:

$$I \geq I_{\text{д1}}, \rightarrow x_{11} = 1; \quad (2.28)$$

- 2) условие развития вибрационной болезни в виде превышения действующего виброускорения  $a$ , ( $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ ) над санитарно-допустимым порогом:

$$a \geq a_{\text{д1}}, \rightarrow x_{12} = 1. \quad (2.29)$$

В качестве логических условий, описывающих предпосылки ослабления или устранения исхода ВИ-1, были приняты следующие:

$z_{11} = 1$ , - применение наушников для защиты от шума и обеспечение выполнения условия  $x_{11} = 0$ ;

$z_{12} = 1$ , - применение перчаток для защиты от вибрации и обеспечение выполнения условия  $x_{12} = 0$ .

Для построения логической модели ВИ-2 были введены и описаны следующие параметрические условия и логические переменные.

К параметрическим условиям были отнесены следующие:

условие развития бронхита, описываемое параметром – текущей концентрацией  $n_1(t)$  (мг/м<sup>3</sup>) частиц пыли с диаметром  $d \geq 5$  мкм и превышение её значения над пороговым  $N_{П1}$  :

$$n_1(t) \geq N_{П1} \quad (2.30)$$

условие развития пневмокониоза, описываемое параметром – текущей концентрацией  $n_2(t)$  (мг/м<sup>3</sup>) частиц пыли с диаметром  $d \leq 5$  мкм и превышение её значения над пороговым  $N_{П2}$  :

$$n_2(t) \geq N_{П2} \quad (2.31)$$

В качестве логических условий, описывающих предпосылки ослабления или устранения исхода ВИ-2, были приняты следующие:

$z_{21} = 1$ , - применение респиратора – фильтра частиц пыли с диаметром  $d \geq 5$  мкм,

$z_{22} = 1$ , - применение респиратора – фильтра частиц пыли с диаметром  $d \leq 5$  мкм.

С учетом принятых обозначений логические модели вершинных исходов имеют следующий вид.

ВИ-1:

$$y_1 = z_{11} \cdot x_{11} \vee z_{12} \cdot x_{12} . \quad (2.32)$$

Логическая модель ВИ-2:

$$y_2 = z_{21} \cdot x_{21} \vee z_{22} \cdot x_{22} . \quad (2.33)$$

Согласно алгоритму преобразования, п.1.5.5, были получены следующие зависимости возможностной меры вершинных исходов

$$\Pi_1 = \text{Pos}(y_1=1) = \max \{ \min(\pi_{z_{11}}, \pi_{11}), \min(\pi_{z_{12}}, \pi_{12}) \}, \quad (2.36)$$

$$\Pi_2 = \text{Pos}(y_2=1) = \max \{ \min(\pi_{z_{21}}, \pi_{21}), \min(\pi_{z_{22}}, \pi_{22}) \}. \quad (2.37)$$

В зависимостях переменные типа  $\pi_z$  представляют возможность меру реализации логических условий типа:

$$\pi_{z_{11}} = \text{Pos}(x_{11} = 1). \quad (2.38)$$

Тогда как переменные типа  $\pi_{11}$  представляют возможность меру реализации логических условий типа:

$$\pi_{11} = \text{Pos}(n_1(t) \geq N_{11}). \quad (2.39)$$

Определение значений переменных типа  $\pi_z$  находят путем статистической оценки вида  $p^* = \text{Pro}(x_{11} = 1)$ .

Тогда как значения переменных типа  $\pi_{11}$  рассчитывают с помощью параметрической модели «нечеткое воздействие – нечеткая восприимчивость».

## Выводы к разделу 2.

1. Для конкретных технических систем выбраны вершинные исходы, построены их логические модели, выбраны и обоснованы параметрические модели реализации каждой конкретной предпосылки исходов систем.
2. На основании правил преобразования (раздел 1) и выбранных исходных данных рассчитаны возможные меры реализации вершинных исходов (пожара, отравления) в рассматриваемых уникальных системах.
3. На основании проведенного анализа типовых сценариев возможных аварий на производственной составляющей – система газоснабжения котельной, можно сделать вывод, что наиболее опасным является следующий сценарий (С2): разрыв разводящего газового коллектора → истечение природного газа → образование газозвоздушной смеси в

закрытом пространстве главного корпуса котельной → источник пламени → объемный взрыв → термическое поражение людей, разрушение избыточным давлением теплотехнического оборудования и сооружения главного корпуса котельной → поражение населения близлежащих улиц вторичными поражающими факторами.

4. Наиболее оптимальным вариантом для предотвращения развития данного сценария является установка системы мониторинга утечки газа на основе комбинации резистивных полупроводниковых, сегнетоэлектрических и оптических волноводных сенсоров пропан-бутановой смеси (газовых сенсоров).
5. Вероятность возникновения пожара  $Q_p$  на конкретно взятом объекте оценивают с приемлемой достоверностью на основе метода факторного параметрического моделирования и возможностной оценки риска. Мониторинг объекта производят с помощью измерительной информационной системы на основе: 1) сегнетоэлектрических сенсоров видимого и 2) инфракрасного оптического излучения и 3) химического (стехиометрического) состава горючих веществ, которая позволяет обнаруживать и управлять включением установок автоматического пожаротушения с последующей локальной ликвидацией предпосылок пожара.
6. При этом применение способа 2 основано на двух положениях. 1. Достоверное обнаружение (ДО) факта пожара основано на одновременном срабатывании всех трех сенсоров. 2. Факт срабатывания двух из трех сенсоров со степенью доверия  $\varepsilon$  принимается за ложную тревогу (ЛТ). Применение этой измерительной информационной системы позволяет достоверно (с вероятностью до 0.970299) обнаруживать возникновение предпосылок пожара путем применения комбинаций из 2 или 3 сенсоров при их одновременном срабатывании. Считая, что  $\varepsilon = 0.003$ , доверительные значения

вероятности ложного отказа (то есть срабатывания двух из трёх сенсоров и формирование команды «пожар на объекте») не превысит значение  $\alpha = 0.025$ . Фактически это означает, что один из сорока сигналов о пожаре от измерительной системы СРОПП может быть ложным. При наличии системы автономного пожаротушения с тремя независимыми устройствами, с вероятностью их отказа  $q = 0.01$ , оцениваемая вероятность тушения пожара находится в интервале значений от 0.970299 до 0.999999. При этом, как видно, верхняя граница вероятности обнаружения признаков пожара достигает требуемого значения:  $(1 - 10^{-6})$ .

## Список литературы к разделу 2

1. Безопасность жизнедеятельности: Учебник для вузов / С.В. Белов, А.В. Ильницкая, А.Ф. Козьяков и др.; Под общ ред. С.В. Белова. 9-е изд. испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2009. 606 с.
2. Русак О.Н., Малаян К.Р., Занько Н.Г. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие. 7-е изд., стер. / Под ред. О.Н. Русака. – СПб.: Изд. «Лань». 2009 – 448 с.
3. Зотов А.И., Курдюмов В.С. Безопасность жизнедеятельности. Учебник. – Колос. 2009. 2 изд. 484 с.
4. Есипов Ю.В., Самсонов Ф.А., Черемисин А.И. Мониторинг и оценка риска систем «защита – объект – среда». М.: Изд. ЛКИ – УРСС. 3 изд., 2013. 138 с.

### **3. Расчет количественной меры вершинных исходов для тест-объекта – крысы при действии наноразмерного диоксида титана**

#### **3.1. Введение**

Нанотехнологии, в качестве движущей силы современной экономики, инициируют революционные направления биотехнологической, фармацевтической, медицинской, химической, мультимедийной, аэрокосмической, и компьютерной индустрии, а также многие другие новые перспективные бурно развивающиеся приложения. Нанотехнологии являются одним из главных приоритетов в стратегии развития науки во всем мире. Области приложения нанотехнологий продолжают быстро расти. Это приводит к увеличению в биосфере наноразмерных частиц и глобальному экологическому риску для окружающей среды, с последующим негативным воздействием на различные экосистемы. Исследования показали [1-2], что высвобождаемые нанообъекты могут повлиять на биологические процессы на клеточном, субклеточном и белковых уровнях. Более того, некоторые наночастицы легко мигрируют по всему телу, накапливаются в органах-мишенях, проникают через клеточные мембраны, накапливаются в митохондриях, и могут вызывать вредные воздействия разного уровня. Поэтому необходима оценка такого рода риска для надлежащей профилактики и разработки контрмер. В связи с этим исследования в области экологического риска в системе «нанообъект – живой организм – защита» привлекают все большее внимание [1-4]. Цель состояла в предложении и апробации пороговой концепции оценки вероятности заболевания и (или) гибели конкретного биовида на основе метода факторного анализа параметров системы и возможностной оценки риска.



### 3.2. Методика эксперимента

Для оценки экологического риска системы «нанообъекты – живой организм – защита» чаще всего используется классический подход, основанный на биотестировании водных сред. В качестве тест-объектов используются самые разнообразные живые организмы, приоритетность использования которых пока не определена. В связи с этим не существует единого подхода к оценке риска и, соответственно, нет возможности сравнительного анализа результатов таких оценок. Для иллюстрации данного вопроса рассмотрим результаты биотестирования наноразмерного диоксида титана на различных группах тест-объектов. В качестве нанообъекта, интенсивно загрязняющего биосферу, выбран диоксид титана, поскольку он широко используется в различных областях науки и техники: в производстве синтетического волокна, в косметических средствах, в пищевой промышленности, в полиграфии, при очистке воздуха и воды от органических загрязнений фотокатализом др.

Известны токсические свойства и физиологическое действие кристаллического диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) - ПДКр.з. -  $10 \text{ мг/м}^3$  [5, 6]. Однако в настоящее время уже имеется много экспериментальных данных по токсичности наноразмерного  $\text{TiO}_2$  в гораздо более низких концентрациях. Так, например, исследовано воздействие аэрозоля нано- $\text{TiO}_2$  на самцов крыс через нос в течение 6 часов [7]. Показано, что частицы с размерами до 100 нм дали цитотоксический эффект в бронхах при концентрации  $2 \text{ мг/м}^3$ , а частицы с размерами от 100 до 200 нм и концентрации  $7 \text{ мг/м}^3$  - острый воспалительный эффект. При воздействии аэрозоля на мышей зафиксировано значительное снижение репродуктивной функции во втором поколении [8].

Будучи химически инертным,  $\text{TiO}_2$  относят к малоопасным веществам, однако установлено его прямое токсическое действие на водные организмы,

для которых – ПДК=1,0 мг/л [9,10]. Особенно опасен диоксид титана для гидробионтов в наноразмерном состоянии.

Например, острые биотесты, проведенные на донных рачках *Hyalella Azteca*, продемонстрировали фототоксичность нано-TiO<sub>2</sub> под действием солнечного излучения, которая увеличивается в 21 раз по сравнению с контрольными образцами. Отмечена также агломерация TiO<sub>2</sub> на поверхности рачков, что приводило к появлению язв и смертельным исходам [11].

Ракообразные рода *Artemia* дали токсические эффекты нано-TiO<sub>2</sub> в общем диапазоне концентраций (0,5-100 мг/л). Иглокожие имели аномалии развития на ранних этапах жизни. У морских рыб эффектов смертности не выявлено, но зафиксировано уменьшение времени выведения TiO<sub>2</sub>, изменение плавательной активности и различные пороки развития у эмбрионов. У китообразных исследовали лейкоциты дельфинов (биомаркеры), которые показали повреждения ДНК и снижение жизнеспособности лейкоцитов [12].

В совместной работе американских и китайских ученых [13] показан синергетический эффект на тестовых организмах (*Daphnia*) - в присутствии даже очень низких концентраций нано-TiO<sub>2</sub>, токсичность As (V) значительно увеличивается.

Если эти полученные результаты представлять, как параметры восприимчивости биовидов к действию наноразмерного диоксида титана и описать области возможного варьирования концентрации диоксида титана в среде обитания биовидов (то есть, задать параметры «воздействия»), то на основе метода возможностной (нечеткой) оценки [14, 15] оказывается достижим расчет асимптотических значений вероятности заболевания и (или) гибели конкретных биовидов. В качестве примера в настоящей работе рассмотрен алгоритм подготовки исходных данных и расчета возможностной меры заболевания и летального исхода у крыс при воздействии на них наноразмерного диоксида титана.

### 3.3. Постановка и результаты решения задачи

Известно, что факторный параметрический анализ риска основан на модели «воздействие – восприимчивость» [16, 17] с предварительным описанием вида и области изменения параметра (или) показателя восприимчивости тест-объекта к действию диоксида титана (с учетом влияния сопутствующих абиотических и (или) биотических факторов).

В рамках этой модели была рассмотрена задача о расчете меры определенности (возможности) заболевания и (или) гибели конкретного или подобного биовида.

Алгоритм расчета включал следующие этапы.

1. Описание (например, в виде параметра и размерности концентрации  $n_r$ ) интервала параметра восприимчивости:

- нижнее «различимое» значение концентрации ( $\text{мг/м}^3$ ), начиная с которого с вероятностью (квантилем доверия), обычно это значение – 0.003, возможно начало гибели:  $\bar{r} - \Delta r$ ,

- верхнее значение концентрации ( $\text{мг/м}^3$ ), при котором гибель достоверна:  $\bar{r}$  (в терминах нечетких величин это значение называют «ядром»).

2. Задание (в размерности концентрации) ожидаемого (требуемого) интервала параметра воздействия с границами:

1) ядра ( $\bar{s}$ ) и

2) верхнего значения  $\bar{s} + \Delta_s$ .

Причем отметим, что воздействие (как внешний независимый фактор) до (и на уровне) ядра достоверно (вероятность проявления равна 1), а уже на уровне верхнего значения вероятность проявления воздействия меньше или равна уровня  $\alpha$  среза (обычно это значение – 0.003, то есть исходят из допущения трёх сигм).

Так, например, в системе «биовид-крыса – защита – среда (аэрозоли диоксида титана)» действуют «наноразмерные» аэрозоли  $\text{TiO}_2$  с размерами до 100 нм в интервале значений концентрации от 1 до 20 ( $\text{мг/м}^3$ ) [5]. Можно рассчитать возможностную меру (ВМ) заболевания и гибели крысы, если установлено, что его параметры восприимчивости следующие: ПДК = 2 ( $\text{мг/м}^3$ ),  $\text{LD}_{50\%} = k \cdot \text{ПДК} = 15 \cdot \text{ПДК} = 30$  ( $\text{мг/м}^3$ ). Принимается, что погрешность определения параметров восприимчивости составляет  $\delta = 50\%$ .

Результаты и их обсуждение.

1. Сначала рассматривался исход – заболевание. Запишем исходные данные в абсолютных единицах ( $\text{мг/м}^3$ ):

$$\bar{s} = 1, \quad \bar{s} + \Delta_s = 20;$$

интервал размытости воздействия  $\Delta_s = 19$ ;

ядро восприимчивости к заболеванию  $\bar{r} = 2$ ;

интервал размытости  $\Delta_r = \delta \cdot \bar{r} = 1$ ;

нижняя граница восприимчивости к заболеванию  $\bar{r} - \Delta_r = 1$ ;

запас безопасности  $\bar{r} - \bar{s} = 1$ ;

суммарный интервал размытости  $\Delta_r + \Delta_s = 20$ ;

приведенный запас безопасности  $\bar{z}b = 0.05$ .

Тогда значение ВМ заболевания в линейной модели аппроксимации определялась как:

$$\pi L_i = 1 - \bar{z}b = 1 - (\bar{r} - \bar{s}) / (\Delta_r + \Delta_s) = 0.95.$$

В гауссовой модели аппроксимации значение ВМ заболевания:

$$\pi n_\alpha = \exp(-4.5 \cdot \bar{z}b_\alpha^2) = \exp(-0.0125) = 0.986.$$

В итоге ВМ заболевания крысы составляла значение вблизи к 1 (~ 100%).

2. Рассмотрим исход – гибель. Запишем исходные данные в абсолютных единицах ( $\text{мг/м}^3$ ):

$$\bar{s} = 1, \quad \bar{s} + \Delta_s = 20;$$

интервал размытости воздействия  $\Delta_s = 19$ ;

ядро восприимчивости к гибели  $\bar{r} = 30$ ;

интервал размытости  $\Delta_r = \delta \cdot \bar{r} = 15$ ;

нижняя граница восприимчивости к гибели  $\bar{r} - \Delta_r = 15$ ;

запас безопасности  $\bar{r} - \bar{s} = 29$ ;

суммарный интервал размытости  $\Delta_r + \Delta_s = 34$ ;

приведенный запас безопасности  $\bar{z}b = 29/34 = 0.852$ .

Значение ВМ гибели в линейной модели аппроксимации:

$$\pi L_i = 1 - \bar{z}b = 1 - (\bar{r} - \bar{s}) / (\Delta_r + \Delta_s) = 0.148.$$

В гауссовой модели аппроксимации:

$$\pi n_\alpha = \exp(-4.5 \cdot \bar{z}b_\alpha^2) = \exp(-0.098) = 0.161.$$

### Выводы к разделу 3

1. Нами впервые показано, что на клеточном, субклеточном и белковых уровнях для оценки риска системы «нанообъект – живой организм – защита» можно эффективно применять пороговую концепцию оценки вероятности заболевания и (или) гибели конкретного биовида, основу которой составляет метод факторного анализа сложной системы и возможностной оценки риска. Это свидетельствует о научной значимости полученных результатов, которые можно будет использовать для надлежащей профилактики и разработки контрмер.
2. К прагматическим результатам относится алгоритм подготовки исходных данных и расчета возможностной меры, причем на примере воздействия наноразмерного диоксида титана на крыс установлено, что вероятность летального исхода данного биовида невелика, а вероятность заболевания практически равняется 100%.

### Список литературы к разделу 3

1. Л.Е. Пустовая, Б.Ч. Месхи Нанотехнологии. Безопасность. Экология. Изд-во ДГТУ, Ростов-на-Дону, 2011.
2. Баян Е.М., Пустовая Л.Е., Лупейко Т.Г. Экологическая безопасность при использовании нанотехнологий. Изд-во ДГТУ, Ростов-на-Дону, 2012.
3. Q. Wang et al. A bibliometric analysis of research on the risk of engineering nanomaterials during 1999–2012 / Science of the Total Environment. 473–474 (2014) 483–489
4. ГН 2.2.5.1313-03 «ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны»
5. A. Noela, K. Maghnib, Y. Cloutierc et al. Effects of inhaled nano-TiO<sub>2</sub> aerosols showing two distinct agglomeration states on rat lungs. Toxicology Letters. 214 (2012) 109– 119
6. Zdenka Orabi Kyjovskaa, Anne Mette Z. Boisen et al. Daily sperm production: Application in studies of prenatal exposure to nanoparticles in mice. Reproductive Toxicology. 36 (2013) 88– 97
7. Перечень ПДК и ОБУВ вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов к Приказу Комитета РФ по рыболовству от 28.06.1995 N 100.
8. Shibin Li, Lindsay K.Wallis, Hongbo Ma, Stephen A. Diamond. Phototoxicity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles to a freshwater benthic amphipod: Are benthic systems at risk? Science of the Total Environment, USA, 466–467 (2014) 800–808
9. D. Minetto, G. Libralato, A. Volpi Ghirardini. Ecotoxicity of engineered TiO<sub>2</sub> nanoparticles to saltwater organisms: An overview. Environment International 66 (2014) 18–27
10. Demin Wang, Ji Hu, David R. Irons, Jianmin Wang. Synergistic toxic effect of nano-TiO<sub>2</sub> and As(V) on Ceriodaphnia dubia. Science of the Total Environment. 409 (2011) 1351–1356

11. Shibin Li, Lindsay K.Wallis, Hongbo Ma, Stephen A. Diamond. Phototoxicity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles to a freshwater benthic amphipod: Are benthic systems at risk? *Science of the Total Environment*, USA, 466–467 (2014) 800–808
12. D. Minetto, G. Libralato, A. Volpi Ghirardini. Ecotoxicity of engineered TiO<sub>2</sub> nanoparticles to saltwater organisms: An overview. *Environment International* 66 (2014) 18–27
13. Есипов Ю.В., Самсонов Ф.А., Черемисин А.И. Мониторинг и оценка риска систем «защита – объект – среда». М.: Изд. ЛКИ – УРСС. 3 изд., 2013. 138 с.
14. Gorshkova Y.V., Kazarnikova A.V., Yesipov Y.V. Risk analysis on sturgeon diseases appearance in the aquaculture of south Russia. Abstract book. 16-th International conference on diseases of fish and shellfish. Tampere, September 2-6, 2013. P. 182.
15. Есипов Ю.В. Постановка и пути решения проблемы оценки риска сложных техногенных систем // Управление риском. М.: №1, 2003
16. Есипов Ю.В. Концепция возможностной оценки риска техногенных систем // Автоматика и Телемеханика. № 7. 2003. С. 5 – 12
17. Месхи Б.Ч., Пустовая Л.Е., Богданова И.В., Хлебунов С.А. Современные проблемы безопасности, Донской государственный технический университет. Ростов-на-Дону, 2011.
18. Пустовая Л.Е. Методы и приборы контроля окружающей среды. экологический мониторинг: учебное пособие / Л. Е. Пустовая, Б. Ч. Месхи; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Донской гос. технический ун-т. Ростов-на-Дону, 2008.

#### 4. Логико-возможностное обоснование страховых взносов

##### 4.1. Оценка стоимости интегрального риска (возможных потерь) в системе «спортсмен – соревновательная и тренировочная среда»

Дифференциальным риском называется вероятный ущерб в системе (ПОО – ОВФ – СМЗ – Ч), рассматриваемый относительно выбранного множества нежелательных исходов и (или) компонент этой системы.

Под интегральным риском понимается зависимость вида [1, 2]:

$$R_u = \sum_j \sum_i p_{ji} \left( \sum_h u_{hji} \right), \quad (4.1)$$

где  $j \in J$  - множество происшествий, происходящих (способных произойти) за жизненный цикл ( ЖЦ ) потенциально опасного объекта,

$i \in I$  - множество этапов ЖЦ,

$h \in H$  - множество видов ущерба от  $(i, j)$  вида происшествия,

$p, u$  – вероятность и ущерб от  $(i, j)$  вида происшествия.

Причем риск выражается в форме:

1) количества происшествий (несчастных случаев, летальных исходов, аварий и т. д.), отнесенных к числу анализируемых объектов, людей или систем за выбранный период времени, например, календарный год;

2) стоимости ущербов, например, в минимальных размерах оплаты труда (МРОТ), которые несут (способны нести) происшествия, отнесенное к совокупности объектов за календарный год.

В рамках теории логико-возможностной оценки (ЛВО) [3] при условии рассмотрения:

1) только несовместных,

2) полностью совместных групп происшествий, стоимость риска системы определяется с помощью следующего выражений [4].

Для множества  $\{N\}$  происшествий с одним работником



$$R_u(\{N\}) = \max \{ (\pi \cdot u)_1, \dots, (\pi \cdot u)_{n=N} \} = \max \{ r_1, \dots, r_n, \dots, r_N \} = R_u^{(1)}(N) \quad (4.2)$$

Для множества  $\{N\}$  происшествий с множеством  $\{M\}$  работников

$$R_u(\{N, M\}) = R_u = \max \{ \min (\pi \cdot u)_1, \dots, (\pi \cdot u)_k \} = \max \{ r_1, \dots, r_k \}, \quad (4.3)$$

где  $\pi$ ,  $u$  и  $r = \pi \cdot u$  – соответственно, возможность наступления случая – происшествия, стоимость ущерба и риск от происшествия;  $k$  – индекс происшествия в системе.

Остановимся на зависимости (3) более подробно.

Рассматривается множество  $M = \{m\}$  «пронумерованных» работников,  $m = 1, m = 2, \dots, m = M1$ , где  $M1$  – число работников. С каждым из работников в течение рассматриваемого периода (за один календарный год) может произойти однократное происшествие вида: несчастный случай, присвоим номер  $n = 1$ , или заболевание, присвоим номер  $n = 2$ .

В общей постановке можно рассматривать множество видов однократных  $N = \{n\} = 1, 2, 3, \dots, nN$  происшествий: травма,  $n = 1$ , увечье,  $n = 2$ , летальный исход,  $n = 3$ , профессиональное заболевание органов зрения,  $n = 4$ , профессиональное заболевание органов слуха,  $n = 5$ . Причем число  $nN$  различаемых происшествий устанавливает эксперт.

Принимается, что любой случай происшествия с любым работником может произойти только один раз в год с возможностью мерой  $\pi_{mn}$ .

Потери (ущерб компании) от прекращения труда работника  $m$  вследствие наступления происшествия  $n$  выразим как  $u_{mn}$ .

В простейшем варианте потери могут быть выражены через длительность простоя (трудопотерь)  $\tau_{mn}$  работника под номером  $m$ .

С учетом принятых условий и выражения (3) относительно любого работника суммарный риск потерь определяется как:

$$R_u = \max_{n=1}^N \{ (\pi \cdot u)_1, \dots, (\pi \cdot u)_N \} = (R_u^N)_m, \quad (4.4)$$

Тогда суммарные потери от множества случаев – происшествий с множеством работников запишем в виде:

$$R(N,M) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (\max (\pi \cdot u)_{m,n}). \quad (4.5)$$

Предположим, что потери и расходы от происшествий в системе выражаются в МРОТ или денежных единицах (руб.) и определяются как сумма двух основных составляющих:

1) стоимости трудовой потери:

$$c_{1mn}(\tau) = k_{\tau m} \cdot \tau_1(m,n) \quad (4.6)$$

вследствие заболевания работника ( $m$ ) на время  $\tau_1(m,n)$  (суток),

где  $k_{\tau m}$  - посуточная ставка оплаты этого работника;

2) стоимости затрат:

$$c_{2mn}(\tau) = c_{2mn} \cdot \tau_2(m,n) \quad (4.7)$$

на лечение и реабилитацию работника ( $m$ ) в течение времени  $\tau_2$ , (суток),

где  $c_{2mn}$  – стоимость посуточных расходов на лечение и (или) реабилитацию этого работника, с которым случилось происшествие вида ( $n$ ).

Очевидно, что параметры  $k_{\tau m}$  и  $c_{2mn}$  зависят от вида ( $n$ ) происшествия, статуса работника ( $m$ ) и степени тяжести заболевания или несчастного случая. Значения этих параметров устанавливают заранее с привлечением экономистов, управленцев и медицинских экспертов.

Подставляя выражения (6) и (7) в (5), получим аналитическую зависимость стоимостной формы интегрального риска (возможных потерь) в системе «работник – производственная среда – работодатель» при возникновении в ней множества происшествий  $\{N, M\}$ :

$$RC(N,M) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (\max (\pi_{m,n} \cdot (k_{\tau}(m,n) \cdot \tau_1(m,n) + c_{2mn} \cdot \tau_2(m,n)))) \text{ (руб./год)} \quad (4.8)$$

где  $\pi_{m,n} \cdot k_{\tau}(m,n)$  – возможная посуточная стоимость потерь от происшествия  $n$  вида с работником под номером  $m$ .

На основании рассмотренной модели (8) и алгоритма (5-7) рассчитаем стоимость интегрального риска в технической системе ТС1, экспертиза которой выявила следующие параметры и характеристики.

Пример. Дана группа спортсменов ГС1, исходные данные о которой и промежуточные расчетные результаты приведены в Таблицах 4.1 – 4.3.

В результате, после подстановки табличных значений в формулу (4.8) получим значение интегрального риска (руб.) системы спортсменов

$$RC(N,M) = \sum_{m=1}^3 (1800+400+2100) = 4300 \text{ руб.}$$

Расчетное значение интегрального риска системы представляет ожидаемый или прогнозируемый ущерб от однократной реализации вершинных исходов (возможных происшествий) со спортсменами за календарный год. Если принять среднемесячную стипендию равной 400 руб., то потери примерно равны годовой стипендии спортсмена.

Таблица 4.1 - Вероятность  $\pi_{m,n}$  вершинного исхода

m / n	спортсмен	травма, $n = 1$	увечье, $n = 2$	заболевание, $n = 3$
1	метатель	0.9	0.1	0
2	прыгун	0	0.2	0.8
3	бегун	0	0.7	0.3

Таблица 4.2 - Продолжительность  $\tau_1(m,n)$ , сутки и стоимость трудопотерь  $k_\tau \cdot \tau_1$  (руб.)

m/n	спортсмен	травма, $n = 1$	увечье, $n = 2$	заболевание, $n = 3$	$\max \pi k \cdot \tau$
1	метатель, $k_\tau = 10$	$10 \times 10 = 100$	$20 \times 10 = 200$	$0 \times 10 = 0$	90
2	прыгун, $k_\tau = 5$	$0 \times 5 = 0$	$30 \times 5 = 150$	$20 \times 5 = 100$	80
3	бегун, $k_\tau = 15$	$0 \times 15 = 0$	$40 \times 15 = 600$	$30 \times 15 = 450$	420

Таблица 4.3 - Продолжительность  $\tau_2(m,n)$ , сут.  $\times$  стоимость лечения  $c_{2mn}$  (руб.), максимум

m / n	спортсмен	травма, $n = 1$	увечье, $n = 2$	заболевание, $n = 3$	$\max p_k \cdot \tau$
1	метатель	$20 \times 20 = 400$	$40 \times 50 = 2000$	$0 \times 10 = 0$	1800
2	прыгун	$0 \times 10 = 0$	$40 \times 50 = 2000$	$10 \times 20 = 200$	400
3	бегун	$0 \times 10 = 0$	$50 \times 60 = 3000$	$20 \times 20 = 400$	2100

#### 4.2. Логико-возможностная оценка уровней страховых взносов в нетипичных системах

**Введение.** В теории страхования нетипичных и статистически слабо изученных систем актуальной научной задачей является обоснование уровней страховых взносов на основе оценки стоимости страхуемого риска [1-4]. При этом нетто-ставка страхования, как объективная и зависящая только от «природы» компонента страхового взноса, может быть установлена в рамках методологии факторного параметрического моделирования и возможностной (нечеткой) оценки риска систем вида «защита – объект – среда» [5,6].

**Постановка задачи.** Рассматривается страховой кластер вида «одна страховая компания – множество страхователей объектов». Страховая компания (далее, компания) на период (срок страхования)  $T_I$  заключает страховые договора со множеством страхователей объектов  $\mathbf{O} = \{o_n\}$ , где  $n$  – индекс сочетаний объектов из множества  $\mathbf{N}$ ,  $n \in \mathbf{N}$ . Принимается, что множеству страхователей соответствует множество  $\mathbf{N}$  статистически слабо

изученных систем (ССИС) вида «объект страхования – защита – внешние и внутренние негативные факторы».

В рамках каждого звена кластера «компания –  $n$  страхователь» формулируется задача о принятии субъективного решения противоположных сторон, как игроков “против природы”, по оценке стоимостной формы страхуемого риска подсистемы. При этом с позиции “игроков – страхователей” необходимо установить минимально возможные уровни страховых взносов для компенсации и возмещения ущерба при возникновении страховых случаев, а с позиции “игрока – компании” необходимо найти уровни, удовлетворяющие условию неубыточности.

**Требуется** для каждого звена кластера «компания – страхователь» оценить значение нетто-ставки страхования.

#### **Теоретико-множественная и лингвистическая формализация задачи.**

В общем случае, страховой кластер может быть представлен следующими показателями, к которым отнесем:

- 1) страховые взносы (insurance payments) (множество  $\mathbf{IP} = \{ip_n\}$ );
- 2) страховые случаи (insurance events) (происшествия) (множество  $\mathbf{IE} = \{ie_{km}\}$ , где  $k$  и  $m$  – индексы страховых случаев и их видов);
- 3) страховые выплаты (insurance repayments) (множество  $\mathbf{IR} = \{ir_n\}$ );
- 4) количество  $N_I$  договоров страхования;
- 5) множество стоимостей  $\mathbf{C} = \{c_n\}$  и общая стоимость (sum cost)  $SCI$  застрахованных объектов;
- 6) суммарный годовой страховой взнос  $SIP1$  страхователей, как обратная часть страхового фонда компании;
- 7) априорно неизвестная величина  $SIR$  суммы годовых возмещений компании в адрес страхователей при наступлении договорных страховых случаев.

На основе метода факторного моделирования и возможностной оценки [5,6] роль и влияние способов, средств и мероприятий защиты по исключению и (или) ослаблению действия негативных внешних и вторичных

факторов учтем с помощью установления логической связности предпосылок страховых случаев внутри каждого звена кластера. При этом исходные данные задачи выберем в виде: 1) значений стоимостных, конструктивно-технических и физико-химических характеристик и параметров объектов и способов защиты; 2) возможных значений параметров негативных факторов, действующие (способные действовать) на объекты, как из окружающей среды, так и внутри системы [6,9].

В качестве наиболее ожидаемых видов страховых случаев рассмотрим: 1) аварии на объектах вследствие действия негативных экстремальных факторов (НЭФ) (“активные” происшествия) и 2) повреждения и отказы в объекте (“пассивные” происшествия).

### Результаты решения задачи.

На основании принципа эквивалентности страхования [2,3] нетто-ставка страхования  $G_n$  принимается равной стоимости страхуемого риска  $R_u$  системы:

$$G_n = R_u. \quad (4.9)$$

В рамках теории логико-возможностной оценки (ЛВО) [6, 8, 9] при условии рассмотрения: 1) только несовместных или 2) полностью совместных групп страховых случаев, - страхуемый риск системы определяется с помощью выражений вида:

$$R_u = \max \{ (\pi \cdot u)_1, \dots (\pi \cdot u)_k \} = \max \{ r_1, \dots r_k \}, \quad (4.10)$$

$$R_u = \max \{ \min (\pi \cdot u)_1, \dots (\pi \cdot u)_k \} = \max \{ r_1, \dots r_k \}, \quad (4.11)$$

где  $\pi$ ,  $u$  и  $r = \pi \cdot u$  – соответственно, возможностная мера наступления страхового случая, стоимость ущерба и риск от страхового случая;  $k$  – индекс страхового случая в системе.

При одном страховом случае в системе:

$$G_n = R_u = \pi \cdot u. \quad (4.12)$$

При условии учета двух различающихся страховых случаев,  $k = 1, 2$ , с рассчитанными параметрами  $(\pi_1, u_1)$  и  $(\pi_2, u_2)$ , где  $\pi_1 \gg \pi_2$ , а  $u_1 < u_2$ , согласно выражению (4.11) можно записать:

$$R_u = \pi_2 \cdot u_1. \quad (4.13)$$

В рамках теории принятия решений при условии минимизации ошибки не обнаружения страхового случая (ошибки 2 рода) [6] получено, что возможностная  $\pi$  и вероятностная (частотная)  $p$  меры наступления страхового случая находятся в следующем соотношении

$$\pi \approx p + \alpha, \quad (4.14)$$

где  $\alpha$  - ошибка «ложного» решения о возникновении страхового случая (ошибка 1 рода).

Учет (4.14) означает, что расчет по зависимостям (4.9-4.11) может привести к принятию завышенных значений нетто-ставки страхования относительно её истинного значения. Однако с позиции страховщика данное обстоятельство может быть расценено как положительное для возможности повышения устойчивости страхового фонда кластера. Очевидно, что при повышении полноты и достоверности логико-возможностного анализа, возможностная мера  $\pi$  асимптотически приближается сверху к вероятности  $p$  страхового случая.

**Решение задачи на примере.** Дана нетипичная и статистически слабо изученная система ССИС 1, в которой рассматриваются следующие страховые случаи: 1) пожар на объекте; 2) химическое отравление персонала. На основании метода ЛВО были получены следующие ВМ страховых случаев  $\pi_1 = 10^{-4}$ ,  $\pi_2 = 3 \cdot 10^{-2}$ . В дополнение к этим результатам «по методу аналогий» [2,4] получены следующие результаты оценки вероятности возникновения страховых случаев в системе:  $p_1 = 10^{-5}$ ;  $p_2 = 10^{-2}$ . Страховая сумма для каждого случая была принята соответственно равной  $u_1 = 10^7$ ;  $u_2 = 10^4$ . Определить нетто-ставку страхования для рассматриваемой системы.

*Результаты решения.*

$R_u(\pi) = \pi \cdot u$ , для  $k = 1, 2$ :  $r_1 = 1000$ ;  $r_2 = 300$ ;  $R_u(1,2) = \max \{ r_1, r_2 \} = 1000$ .

$R_u(p) = p \cdot u$ , для  $k = 1, 2$ : 100; 100. Причем  $R_u(1,2) = 200$ .

#### **Выводы к разделу 4.**

1. Выполнена теоретико-множественная и лингвистическая формализация задачи оценки уровней страховых взносов в статистически нетипичных системах.
2. На основании принципа эквивалентности страхования в рамках теории логико-возможностной оценки страхуемого риска получены зависимости нетто-ставки страхования для простейших вариантов страховых случаев.
3. Проведен учет и анализ влияния ошибки «ложного» решения о возникновении страхового случая при использовании возможностной меры в расчетах нетто-ставки страхования.
4. Полученные результаты могут быть полезны для разработки методики, которая, с одной стороны, может быть использована страховой компанией как компромиссный инструмент формирования требований к страхователям при количественном анализе и оценке риска, так и, с другой стороны, как средство оценки и управления качеством защиты объектов страхования с позиции минимизации страховых взносов страхователя.

#### **Список литературы к разделу 4**

1. Безопасность России. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. / Воробьев Ю.Л., Лаверов Н.П., Махутов Н.А., Осипов В.И.,



- Фалеев М.И., Фролов К.В., Шойгу С.К. Ч.1-2. МГФ «Знание». 2006. с.278-291. ISBN 5-87633-074-4.
2. Гаенко В.П. Современные методы анализа и оценки безопасности сложных технических систем. СПб.: Изд. НИЦ БТС. 2004. 212 с.
  3. Есипов Ю.В., Самсонов Ф.А., Черемисин А.И. Мониторинг и оценка риска систем «защита – объект – среда». М.: Изд. ЛКИ – УРСС. 3 изд., 2013. 138 с.
  4. Есипов В.Ю., Есипов Ю.В., Калиенко С.И. Логико-возможностная оценка уровней страховых взносов в нетиповых системах. // Страховое дело. 2012. В. 6. С. 57-62.
  5. Шахов В.В., Миллерман А.С., Медведев В.Г. Теория и управление рисками в страховании. – М.: Финансы и статистика. 2002. 224 с.
  6. Теория и практика страхования / Под общей редакцией Турбиной К.Е. – М. Анкил. 2003. 704 с. ; с.24
  7. Балабанов И.Т. Страхование. СПб: Питер, 2002 – 256 с.
  8. Е.А. Козлова. Особенности расчета тарифной ставки при проведении страхования по пакету рисков. Журнал "Финансовый менеджмент в страховой компании", 2007, № 1. с. 43-51.
  9. Рябинин И.А., Черкесов Г.М. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М., Радио и связь. 1981. 263 с.
  - 10.Поспелов Д.А. Ситуационное управление в сложных системах. – М. Наука. 1987. 346 с.
  - 11.Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990, - 422 с.
  - 12.Есипов Ю.В. Постановка и пути решения проблемы оценки риска сложных техногенных систем. Управление риском. М.: №1, 2003, с. 38 – 43.

## Заключение

1. На основании логических моделей и правил их преобразования в меры определенности (раздел 1) изучены и решены актуальные технические и экологические задачи по расчету показателей безопасности (разделы 2 и 3) в виде возможностных мер пожара и отравления работников. Поскольку рассмотрены «уникальные» системы, исходные данные о которых относят к приближенным (нечетким) величинам, то применяемый «формализм» как сочетание статистического и возможностного методов оценки, по сути, является единственно возможным, позволяющим получать количественные значения показателей безопасности.
2. Если представлять рассмотренные системы и вершинные исходы в них как страхуемые системы и случаи, то, как представлено в разделе 4, оказывается достижимыми решения задач комплексного инженерного обоснования и расчета стоимостной формы и значения интегрального риска, которая по сути (К. Маркс, А. Шахов) представляет «нетто» страховые взносы страхователей в страховой фонд страховщика. Такой подход является новым и актуальным. А его распространение позволит оптимизировать деятельность целой отрасли.
3. Показано, что взамен логико-вероятностного метода для автономной экспертизы может быть применен логико-возможностный способ определения показателей безопасности и риска систем различной природы, позволяющий получать результаты с приемлемой полнотой и достоверностью.
4. Представлены результаты решения задачи а) разработки алгоритмов и методик расчета показателей безопасности и риска на основе подготовки исходных данных о видах факторов и интервалах значений параметров воздействия и восприимчивости в штатных и аварийных условиях

системы; б) построения и накопления типовых логических и параметрических моделей вершинных исходов (происшествий или аварий); в) разработки и апробации правил верификации на основе сравнительного анализа результатов расчета вероятностных и возможностных показателей безопасности и риска.

## **5. Методика выполнения контрольных работ**

Контрольная работа представляет собой подготовку исходных данных для экспертизы безопасности изученной ранее технической или экологической системы и выполнение тестового задания (письменные ответы на теоретический, методический и экспертный вопросы и решение расчетной задачи). Работа выполняется по варианту, номер которого выбирается из таблицы 1 и совпадает с последней и предпоследней цифрой учебного шифра студента, а вариант в рамках каждой задачи выбирается по последней цифре учебного шифра. Необходимые данные приведены в таблицах к каждой задаче. В качестве «входного или решающего теста» может быть применен принцип «минимум – миниморум», пункт 5 Тестового задания.

Если работа получила положительную оценку, студент допускается к сдаче экзамена по курсу. Основная задача контрольной работы - оказание помощи студенту при самостоятельном изучении учебного материала. В рецензии на контрольную работу преподаватель указывает студенту, на что нужно обратить внимание. Экзамен принимается у студента при условии представления контрольной работы и рецензии на нее с положительной оценкой, а также зачета по лабораторным работам.

Оформленная контрольная работа содержит стандартный титульный лист ДГТУ с указанием названия учебной дисциплины, данных студента и основную часть, включающую письменные ответы на три вопроса и решения одной задачи. Решения задач и ответы на вопросы должны сопровождаться ссылками на литературные источники. В случае необходимости текст может быть дополнен эскизами или рисунками, выполненными карандашом в соответствии с правилами технического черчения и рисования. На каждой странице оставляются поля для замечаний рецензента.

Таблица 5.1 – Исходные данные для выбора варианта рабочего задания

<i>Теоретические, методические и экспертные вопросы</i>										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	1-1, 2-1, 3-10	1-2, 2-2, 3-1	1-3, 2-3, 3-3	1-4, 2-4, 3-4	1-5, 2-5, 3-5	1-6, 2-6, 3-6	1-7, 2-7, 3-7	1-8, 2-8, 3-8	1-9, 2-9, 3-9	10, 30, 50
2	1-1, 3-1, 2-2	1-2, 3-2, 2-2	1-3, 3-3, 2-3	1-4, 3-4, 2-4	1-5, 3-5, 2-5	1-6, 3-6, 2-6	1-7, 3-7, 3-7	18, 38, 58	19, 39, 59	20, 40, 60
3	1-5, 1-3, 3-6	1-6, 2-9, 3-8	1-7, 3-10, 2-1	1-8, 31, 42	1-9, 3-3, 2-5	1-10, 2-2, 3-2	1-3, 2-1, 3-4	1-4, 3-3, 2-6	1-2, 2-6, 3-7	1-9, 2-7, 3-7
4	1-10, 2-10, 3-10	1-9, 2-9, 3-9	1-8, 2-8, 3-8	1-7, 2-7, 3-7	1-6, 2-6, 3-6	1-5, 2-5, 3-5	1-4, 2-4, 3-4	1-3, 2-3, 3-7	1-2, 3-2, 3-8	2-1, 3-5, 1-4
5	1-6, 2-5, 3-6	1-5, 2-10, 3-5	1-1, 2-6, 3-5	1-10, 2-2, 3-6	1-1, 2-9, 3-8	1-3, 3-1, 2-8	1-4, 3-2, 2-9	1-9, 2-5, 3-2	1-5, 3-9, 2-10	1-6, 2-7, 3-7
6	1-6, 2-1, 3-8	1-7, 2-3, 3-9	1-8, 2-4, 3-10	1-9, 2-6, 3-4	1-10, 2-7, 3-5	1-1, 2-7, 3-6	1-2, 2-8, 3-5	1-3, 2-9, 3-8	1-4, 2-10, 3-9	1-5, 2-1, 3-10
7	1-7, 2-3, 3-5	1-2, 3-4, 2-8	1-10, 3-9, 2-5	1-3, 2-9, 3-9	1-4, 3-6, 2-4	1-1, 2-8, 3-6	1-2, 2-9, 3-7	1-3, 2-10, 3-8	1-4, 3-1, 2-9	1-5, 3-2, 2-1
8	1-1, 2-2, 3-10	1-3, 2-1, 3-4	1-4, 3-3, 2-1	1-5, 2-3, 3-3	1-2, 2-7, 3-7	1-5, 2-3, 3-6	1-6, 2-9, 3-8	1-7, 2-9, 3-10	1-8, 3-1, 2-2	1-9, 2-5, 3-8
9	1-5, 2-5, 3-5	1-4, 2-4, 3-4	1-3, 2- 3, 3-7	1-2, 3-2, 2-8	1-8, 3-5, 3-4	1-10, 2-10, 3-10	1-9, 2-9, 3-9	1-8, 2-8, 3-8	1-7, 2-7, 3-7	1-6, 2-6, 3-6
10	1-3, 2-6, 3-9	1-10, 2-2, 3-9	1-1, 2-3, 3-8	1-3, 2-4, 3-9	1-6, 2-5, 3-6	1-5, 2-1, 3-10	1-3, 2-6, 3-9	1-4, 3-2, 310	1-9, 2-2, 3-2	1-10, 2-10, 3-9
Расчетные задачи										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	2	3	4	5	6	7	8	9	1	3
3	4	5	6	7	8	9	2	10	3	5
4	7	9	2	4	6	8	1	9	8	7
5	6	5	4	3	2	1	9	10	4	6
6	5	4	3	2	10	8	7	6	7	1
7	2	6	9	6	7	3	5	4	2	1
8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	2	4	6	8	10	3	5	7	9	1
10	1	4	7	9	8	6	5	3	2	10

*Примечание.* Цифры в горизонтальном ряду соответствуют последней цифре зачетной книжки, а в вертикальном – предпоследней цифре. Номер варианта соответственно выбирается по комбинации двух последних цифр.

## ТЕСТОВОЕ ЗАДАНИЕ

Обучаемые письменно оформляют ответы на вопросы из частей 5.1 – 5.4 **Тестового задания** согласно варианту, определяемого по Таблице 5.1. При этом учитываются знания, полученные при изучении заранее выбранной обучаемым (или заданной преподавателем) технической или экологической системы.

В рамках одного варианта выполнение пунктов 5.1 – 5.4 логически связано и задание является комплексным.

**Требуется** последовательно разработать и получить следующие результаты:

- 1) в рамках заданного происшествия выбрать вершинный исход и подготовить физико-технические данные о возможной его реализации;
- 2) выявить логические и факторные параметрические предпосылки и построить логическую модель вершинного исхода;
- 3) построить конкретную параметрическую модель «воздействие – ослабление – восприимчивость» и описать условие (критерий) превышения воздействия над восприимчивостью, как главной предпосылки для расчета меры определенности реализации вершинного исхода;
- 4) выбрать интервалы, произвести оценку и (или) прогноз областей изменения параметров воздействующих факторов, функций ослабления и восприимчивости человека (биовида);
- 5) установить (рассчитать) значения приведенного параметрического запаса безопасности;
- 6) рассчитать вероятностную или возможность меру реализации вершинного исхода;
- 7) подготовить предложения и дать количественное обоснование эффективности применяемых способов и (или) средств защиты работника.

## **5.1. Теоретические вопросы**

1. Определение безопасности технической системы «объект – защита – факторы – человек (бригада)»
2. Алгоритм расчета показателей безопасности технической системы
3. Алгоритм расчета показателей риска технической системы
4. Построение логической модели на основе лингвистической формулы происшествия
5. Дизъюнктивные и конъюнктивные булевы формы происшествия в технической системе
6. Правила определения вероятности происшествия по булевым функциям вершинных исходов
7. Правила нахождения возможностной (нечеткой) меры происшествия по булевым функциям вершинных исходов
8. Постановка и этапы решения задачи о расчете меры определенности происшествия
9. Определение вероятности происшествия в параметрической модели «воздействие – восприимчивость»
10. Определение возможностной (нечеткой) меры происшествия в нечеткой параметрической модели «воздействие – восприимчивость»

## **5.2. Построение логической модели происшествия**

1. По лингвистической формуле (определению) несчастного случая построить логическую модель вида  $y = f_1(x)$
2. По лингвистической формуле (определению) профессионального заболевания построить логическую модель вида  $y = f_2(x)$
3. По лингвистической формуле (определению) аварии на производстве построить логическую модель вида  $y = f_3(x)$

4. По лингвистической формуле (определению) катастрофы на производстве построить логическую модель вида  $y = f_4(x)$
5. По лингвистической формуле (определению) пожара на объекте построить логическую модель вида  $y = f_5(x)$
6. По лингвистической формуле (определению) отравления человека построить логическую модель вида  $y = f_6(x)$
7. По лингвистической формуле (определению) повреждения работника построить логическую модель вида  $y = f_7(x)$
8. По лингвистической формуле (определению) поражения работника электрическим током построить логическую модель вида  $y = f_8(x)$
9. По лингвистической формуле (определению) теплового удара или ожога работника построить логическую модель вида  $y = f_9(x)$
10. По лингвистической формуле (определению) обморожения работника построить логическую модель вида  $y = f_{10}(x)$

При выполнении руководствоваться материалом раздела 1 (п.1.4 -1.5) и примерами, приведенными в подразделах 2.3 и 4.1

#### Краткие методические указания для выполнения п.5.2

Основой логического моделирования является анализ вербальных определений (лингвистических моделей) происшествий, принятых в нормативно-технической документации.

Предположим упрощенно, что заданное множество происшествий описывается логической моделью вида (см. раздел 1, зависимость (1.5)):

$$y = f(x) = (x_1 \vee x_2) \wedge (x_3 \wedge x_4) \wedge (x_5 \vee x_6) \wedge x_7, \quad (5.1)$$

В зависимости (5.1) булевы переменные  $x_1$  и  $x_2$  соответственно описывают отсутствие ( $x = 1$ ) или наличие ( $x = 0$ ) индивидуальной ( $x_1$ ) или коллективной (конструктивной) ( $x_2$ ) средств защиты. Заметим, что таким



образом моделируются предпосылки вершинных (как неблагоприятных) исходов происшествия.

Булевы переменные  $x_3$  и  $x_4$  соответственно описывают уровни подготовки работника, которые в общем случае выражают отсутствие аттестации ( $x_3 = 1$ ) и не проведение системы инструктажей ( $x_4 = 1$ ) по мерам и правилам безопасности.

Булевы переменные  $x_5$  и  $x_6$  соответственно применяют для описания возможного инициирования ( $x_5 = 1$ ) вторичных негативных факторов в системе и их прохождения ( $x_6 = 1$ ) через конструкцию и дополнительную защиту объекта.

Булева переменная  $x_7$  выступает как индикатор условия превышения параметра воздействия  $s = f \cdot v$  над параметром восприимчивости  $r$ : если  $s \geq r$ , то  $x_7 = 1$ .

Для примера рассмотрим упрощенный способ расчета статистической оценки неприменения работниками средств защиты  $p^* = \text{Pro}(x_1 = 1)$ . Для этого проводят проверку и обработку записей в Журнале регистрации использования ИСЗ следующим образом:

$p_1^* = n_1 / N$ , где  $n_1$  - количество записей о не применении ИСЗ,  $N$  – общее число человеко-дней.

По аналогии статистическую оценку не проведения с работниками инструктажей:

$$p_4^* = \text{Pro}(x_4 = 1) = (1 - m_4 / M),$$

где  $m_4$  - количество проведенных инструктажей,

$M$  – требуемое число инструктажей.

### **5.3. Построение факторной параметрической модели и расчет параметрического запаса безопасности**

1. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: несчастный случай
2. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: профессиональное заболевание
3. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: авария на производстве
4. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: катастрофа на производстве
5. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: пожар на объекте
6. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: отравление человека
7. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: повреждение работника
8. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: поражение работника электрическим током

9. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: тепловой удар или ожог работника

10. Построить факторную параметрическую модель и рассчитать значение параметрического запаса безопасности для вершинного исхода: обморожение работника

Результатом выполнения данного пункта задания является:

- 1) разработка конкретной параметрической модели предпосылки вершинного исхода на основе модели «воздействие – ослабление – восприимчивость»;
- 2) выбор интервалов, оценка или прогноз областей изменения параметров воздействующих факторов, функций ослабления и восприимчивости человека (биовида);
- 3) установление (расчет) значений приведенного параметрического запаса безопасности.

При выполнении руководствоваться материалом подразделов (1.6 – 1.9) и примерами, приведенными в подразделах 2.1, 2.5 и раздела 3.

#### 5.4. Расчетная задача

С учетом заранее выбранной обучаемым (или заданной преподавателем) технической или экологической системы и на основании полученных результатов по предыдущим заданиям 5.1, 5.2 и 5.3

**требуется** рассчитать меру определенности (возможностную или вероятностную меру) реализации вершинного исхода в технической системе на уровне различимости  $\alpha$ :  $10^{-3}$ , ( $\alpha \leq 10^{-3}$ ). При этом область приведенного параметрического запаса рассматривается в пределах:  $zb_{\alpha} \in [0, 2]$ .

Указание А) Уровень «3.0». По графической зависимости  $\pi n_{\alpha}(k_e, zb_{\alpha})$ , см. рисунок 1.5, установить границы значений  $k_e$ ,  $zb_{\alpha}$  при которых будут выполнены требования задачи.

Указание Б) Требуется рассчитать или вероятностную или возможность меру реализации происшествия в системе по дизъюнктивной или конъюнктивной форме логической модели вершинного исхода.

Полученные результаты представить в табличном виде и дать их анализ с позиции применения способов и средств защиты.

### 5.5. Дополнительные вопросы и задачи для самоконтроля

1. Значение возможностной меры достоверного события равно: 0, 1, 0.5.
2. Если носители и функции принадлежности нечетких параметров воздействия и восприимчивости полностью совпадают, то значение возможностной меры превышения воздействия над восприимчивостью равно: 0, 1, 0.5.
3. Записать вероятностную и возможностную формы функции  $y$  и найти значение вероятности и возможности для следующих вариантов:  
 $y_1 = x_1 \wedge x_2$ ;  $y_2 = x_1 \vee x_2$ , если  $p_1 = 1$ ,  $p_2 = 0$ ;  $\pi_1 = 1$ ,  $\pi_2 = 0$ .
4. Рассчитать возможностную меру несчастного случая по функции вершинного исхода  $P = \text{Pos}(y_1 = 1) = \text{Pos}(y_1 = x_1 \vee x_2 \wedge x_3)$ , используя следующие исходные данные:  $\text{Pos}(x_1 = 1) = \pi_1 = 0.1$ ;  $\pi_2 = 0.4$ ;  $\pi_3 = 0.6$ .
5. Рассчитать возможностную меру профессионального заболевания по следующей функции вершинного исхода  $P = \text{Pos}(y_2 = 1) = \text{Pos}(y_2 = (x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4))$ , используя следующие исходные данные:  $\text{Pos}(x_1 = 1) = \pi_1 = 0.2$ ;  $\pi_2 = 0.3$ ;  $\pi_3 = 0.7$ ;  $\pi_4 = 0.5$ .
6. Рассчитать возможностную меру аварии по следующей функции вершинного исхода  $P = \text{Pos}(y_3 = 1) = \text{Pos}(y_3 = (x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4) \vee (x_5 \wedge x_6) \wedge x_7)$ , используя следующие исходные данные:  $\text{Pos}(x_1 = 1) = \pi_1 = 0.05$ ;  $\pi_2 = 0.2$ ;  $\pi_3 = 0.17$ ;  $\pi_4 = 0.25$ ;  $\pi_5 = 0.35$ ;  $\pi_6 = 0.46$ ;  $\pi_7 = 0.6$ .

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Есипов Ю.В., Самсонов Ф.А., Черемисин А.И. Мониторинг и оценка риска систем «защита – объект – среда». М.: Изд. ЛКИ – УРСС. 3 изд., 2013. 138 с.
2. Слепакова В.В., Слепакова Е.В. Событийный анализ и логико-возможностная оценка защиты от несчастных случаев в ООО «Прессовый инструмент» // Труды студентов и аспирантов базовых кафедр ЮНЦ РАН. 2015. Р-н-Д. Изд. ЮНЦ РАН
3. Есипов Ю.В., Горшкова Ю.В., Шишкин Р.И. Моделирование и визуализация зон риска системы на основе критерия «воздействие – восприимчивость» // Вестник Южного научного центра. 2010. Т.6., в.3, с. 21-28.
4. Есипов В.Ю., Есипов Ю.В., Калиенко С.И. Логико-возможностная оценка уровней страховых взносов в нетиповых системах. // Страховое дело. 2012. В. 6. С. 57-62.
5. Есипов Ю.В., Лебедева Е.О., Черемисин А.И. Анализ системы «человек – средства индивидуальной защиты – потенциально опасный объект – окружающая среда» на основе метода факторного параметрического моделирования // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2013. №3. С. 87-90.
6. Есипов Ю.В. Метод возможностной (нечеткой) оценки риска сложных технических систем (глава 6 в монографии) / Безопасность России. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. / Воробьев Ю.Л., Лаверов Н.П., Махутов Н.А., Осипов В.И., Фалеев М.И., Фролов К.В., Шойгу С.К. Ч.1-2. МГФ «Знание». 2006. с.278-291. ISBN 5-87633-074-4.
7. Есипов Ю.В., Черемисин А.И., Самсонов Ф.А., Шишкин Р.И., Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2006613133. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 5 сентября 2006 г. Программа расчета возможностной меры

возникновения происшествий в сложных и уникальных технических системах «Возмер».

8. Есипов Ю.В., Самсонов Ф.А., Хазов А.Е. Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2009616897. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 декабря 2009 г.
9. Есипов Ю.В., Лапсарь А.П. Разработка метода системного анализа потенциальной опасности комплекса «технический объект – нерегламентированные факторы окружающей среды» // Надежность и контроль качества. М.: №11. 1997
10. Есипов Ю.В. Постановка и пути решения проблемы оценки риска сложных техногенных систем // Управление риском. М.: №1, 2003
11. Ю.В. Есипов Задача нахождения возможностной меры аварии в уникальной техногенной системе // Проблемы машиностроения и автоматизации, (2003), 1, 40-44
12. Есипов Ю.В. Концепция возможностной оценки риска техногенных систем // Автоматика и Телемеханика. № 7. 2003. С. 5 – 12
13. Есипов Ю.В. Моделирование опасностей и установление меры определенности происшествия в системе // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 3. 2003. С. 112 – 117
14. Есипов Ю.В. Разработка проекта информационной технологии возможностной оценки риска сложных систем // Управление риском. № 3. 2003. С. 33 – 37
15. Есипов Ю.В. Возможностная оценка риска систем вида «чрезвычайные факторы – потенциально опасный объект – средства и мероприятия защиты – человек» // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. М.: ВИНТИ. № 2. 2004. с.66-73