

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

*На правах рукописи*



Колесников Евгений Юрьевич

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ОЦЕНОК  
АВАРИЙНОГО РИСКА  
ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность  
(в нефтегазовой отрасли)

Диссертация  
на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Научный консультант: Теляков Э.Ш.,  
доктор технических наук, профессор

Йошкар-Ола  
2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	6
<b>Глава 1 Техногенный риск и неопределенность</b>	<b>18</b>
1.1 Неопределенность: качественный и количественный аспекты .....	18
1.2 Краткая история развития научных представлений о риске и неопределенности.....	22
1.3 Постановка проблемы КОН: исторический аспект .....	36
1.4 Подходы к описанию источников неопределенности техногенного риска .	42
1.5 Краткое описание основных типов неопределенности .....	49
1.5.1 Модельная неопределенность .....	49
1.5.2 Параметрическая неопределенность .....	51
1.6 Обзор подходов к оценке неопределенности техногенного риска .....	55
1.6.1 Способы качественного оценивания неопределенности.....	55
1.6.2 Полуколичественные методы оценки неопределенности .....	58
1.6.3 Методы количественной оценки неопределенности .....	59
1.7 Интервальная постановка задачи оценки риска .....	69
1.8 Выводы по главе 1 .....	70
<b>Глава 2 Анализ неопределенности аварийного риска: типы и источники</b>	<b>72</b>
2.1 Типы неопределенности источников аварийного риска .....	72
2.2 Неопределенность алгоритма анализа и количественной оценки аварийного риска .....	74
2.3 Неопределенность этапа оценки параметров головного события аварии ...	78
2.3.1 Методы оценки вероятности вариантов головного события аварии .....	78
2.3.2 Методы оценки параметров головного события аварии, характеризующих ее масштаб .....	84
2.3.3 Источники неопределенности, сопутствующей оценке параметров головного события аварии .....	90
2.4 Неопределенность определения перечня сценариев аварии и оценки их условной вероятности .....	92
2.4.1 Описание подходов к оценке условной вероятности сценариев .....	92
2.4.2 Источники неопределенности, сопутствующей оценке условной вероятности сценариев аварии .....	95
2.5 Анализ неопределенности третьего этапа процедуры КОР .....	95
2.5.1 Поражающие факторы сценария "Пожар пролива" .....	95
2.5.2 Поражающие факторы сценария "Длительное испарение пролива" .....	99
2.5.3 Поражающие факторы сценария BLEVE" .....	104
2.5.4 Поражающие факторы сценария "Огненный шар" .....	110
2.5.5 Поражающие сценария "Факельное горение струи паров" .....	113
2.5.6 Поражающие факторы сценария "Объемный взрыв паров" .....	114
2.5.7 Поражающие факторы сценария "Пожар-вспышка" .....	117

2.5.8	Параметры облака ТВС, дрейфующего под действием ветра .....	118
2.5.9	Параметры физического взрыва сосуда под давлением .....	124
2.5.10	Источники неопределенности при оценке величины целевых метрик сценариев аварии .....	125
2.6	Неопределенность оценки ущерба в натуральном выражении от воздействия поражающих факторов аварии на людей, имущество и компоненты природной среды .....	127
2.6.1	Методы оценки ущерба от воздействия пламени, продуктов горения и потока теплового излучения .....	128
2.6.2	Методы оценки ущерба от воздействия воздушной взрывной волны ....	132
2.6.3	Методы оценки ущерба при осколочном поражении .....	136
2.6.4	Прогнозирование размера ущерба при эскалации аварии .....	139
2.6.5	Источники неопределенности, сопутствующей оценке ущерба в натуральном выражении .....	140
2.7	Неопределенность оценки ущерба от аварии в денежном выражении .....	141
2.7.1	Методы расчета денежного эквивалента полного ущерба, вызванного аварией.....	142
2.7.2	Методологические подходы к монетарной оценке гуманитарного ущерба, обусловленного аварией .....	146
2.7.3	Источники неопределенности этапа монетизации ущерба от аварии.....	149
2.8	Пример количественной оценки модельной неопределенности .....	150
2.9	Пример количественной оценки терминологической неопределенности ....	153
2.10	Выводы по главе 2 .....	154
<b>Глава 3 Интервальная оценка параметров аварийного риска</b> .....		<b>155</b>
3.1	Оценка параметров взрывопожароопасных объектов, расположенных на территории склада светлых нефтепродуктов .....	155
3.2	Оценка параметров аварии на территории склада светлых нефтепродуктов ..	161
3.2.1	Оценка параметров аварии на территории ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов" .....	161
3.2.2	Оценка параметров аварии на ВПОО "Насосная светлых нефтепродуктов" ..	164
3.2.3	Оценка параметров аварии на территории ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов" .....	169
3.3	Оценка целевых метрик сценариев аварии на территории склада светлых нефтепродуктов .....	172
3.3.1	Оценка целевых метрик сценариев аварии на территории ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов" .....	172
3.3.2	Оценка целевых метрик сценариев аварии в здании насосной светлых нефтепродуктов".....	195
3.3.3	Оценка целевых метрик сценариев аварии на территории ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов" .....	196
3.4	Анализ и количественная оценка неопределенности оценок параметров аварии на территории склада светлых нефтепродуктов .....	199
3.4.1	Качественный анализ неопределенности .....	200

3.4.2 Количественная оценка неопределенности .....	201
3.4.3 Оценка значимости параметров модели .....	201
3.4.4 Консервативность допущений.....	202
3.4.5 Способ улучшения интервальных оценок .....	204
3.5 Оценка параметров аварии на территории ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция" .....	205
3.5.1 Оценка параметров головного события аварии .....	210
3.5.2 Оценка целевых метрик сценариев аварии на территории ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция" .....	217
3.6 Оценка параметров аварии на ВПОО "Технологический блок" газораспределительной станции.....	221
3.6.1 Оценка параметров головного события аварии .....	221
3.6.2 Оценка целевых метрик сценариев аварии на ВПОО "Технологический блок" газораспределительной станции.....	227
3.7 Выводы по главе 3 .....	230
<b>Глава 4 Интервально-матричный метод количественной оценки     аварийного риска</b> .....	232
4.1 Суть интервально-матричного метода КОР .....	232
4.2 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов" .....	234
4.2.1 Экономические оценки .....	234
4.2.2 Параметры объектов-мишеней.....	235
4.2.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов" .....	237
4.3 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Насосная светлых нефтепродуктов" .....	253
4.3.1 Экономические оценки.....	253
4.3.2 Параметры объектов-мишеней.....	253
4.3.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Насосная светлых нефтепродуктов".....	253
4.4 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов" .....	256
4.4.1 Экономические оценки.....	256
4.4.2 Параметры объектов-мишеней.....	256
4.4.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов".....	256
4.5 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Технологический блок" газораспределительной станции .....	283
4.5.1 Экономические оценки .....	283
4.5.2 Параметры объектов-мишеней .....	283
4.5.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Технологический блок" газораспределительной станции .....	283

4.6 Интервально-матричная оценка аварийного риска	
ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция" .....	287
4.6.1 Экономические оценки .....	287
4.6.2 Параметры объектов-мишеней .....	287
4.6.3 Расчет целевой метрики аварийного риска	
ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция" .....	288
4.7 Нормирование интервальных метрик аварийного риска .....	297
4.8 Выводы по главе 4 .....	299
Основные результаты и выводы.....	301
Список сокращений и условных обозначений .....	303
Словарь терминов .....	306
Список литературы .....	309
Приложения .....	328
Приложение А Генеральный план склада светлых нефтепродуктов .....	329
Приложение Б Справка о внедрении ПИ "Союзхимпромпроект" .....	330
Приложение В Справка о внедрении ООО "Эксперт бюро" .....	332
Приложение Г Акт внедрения ФГБОУ ВО "ПГТУ" .....	333

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Наряду с традиционным детерминистическим методом управления пожарной и промышленной безопасностью (закключающемся в тщательной регламентации и надзоре) последние полтора десятка лет в России применяется альтернативный метод, основанный на анализе и количественной оценке риска. Использование основанной на риске методологии, разработанной в США в 60-х – 70-х годах прошлого века, в области техногенной безопасности началось в нашей стране с принятием ряда Федеральных законов [118], [119], [120], [123] и нормативных документов [16], [85] и др. Новый этап использования данной методологии, названный "риск-ориентированным подходом", регламентируется недавними документами [79], [122].

В России сфера техногенной безопасности традиционно делится на области, называемые по имени государственных надзорных ведомств (пожарная, промышленная, экологическая, охрана труда). Все они являются различными аспектами одной важнейшей проблемы – безопасности взаимоотношений человека и техносферы, т.е. техногенной безопасности.

2012 год в России в определенном смысле стал вехой в истории развития и применения риск-методологии в области пожарной и промышленной безопасности, поскольку именно в этом году произошли два принципиально важных события: одно в области пожарной, второе – промышленной безопасности:

1) 20 июля 2012 года Государственной Думой России был принят Федеральный закон № 117-ФЗ [117], который внес в Технический регламент "О требованиях пожарной безопасности" [120] изменения, уточняющие нормативы пожарного риска для населения с тем, чтобы они в большей степени соответствовали международным. А.С. Печеркин отметил в [70], что после внесения этих изменений из Регламента полностью исключен пункт 2 статьи 6, в котором содержалась альтернатива, основанная на риске. Таким образом, в июле 2012 года было признано, что четырехлетний опыт показал излишнюю "жесткость" нормативов предельно допустимого пожарного риска, поэтому в обновленной версии Технического регламента [117] величину допустимого индивидуального пожарного риска было решено повысить в сто раз;

2) в том же 2012 году завершилась неудачей попытка ряда ведущих отечественных компаний нефтегазовой отрасли (ОАО "Газпромнефть", ОАО "ЛУКОЙЛ", ОАО "Сибур" и других) внедрить альтернативу традиционному надзорному подходу – альтернативу, основанную на количественной оценке риска аварий (КОР) [67]. Эта попытка была пло-

хо подготовлена и оказалась неудачной. Множество аргументов "против" этой альтернативы, приведенных в статье [57] М.В.Лисанова, Е.В.Ханина и С.И.Сумского, указывают на ряд ошибок предложенного авторами подхода и доказывают, что КОР следует рассматривать лишь как дополнение к существующему подходу в управлении промышленной безопасностью опасных производственных объектов.

Таким образом, в 2012 году закончился первый, "наивный" этап отечественного опыта использования риск-методологии в области пожарной и промышленной безопасности. Следует констатировать, что на сегодняшний день эта методология столкнулась с серьезными проблемами, [40].

В истории развития риск-методологии в области техногенной безопасности уже были периоды, когда само ее существование ставилось под сомнение. Так произошло со знаменитым отчетом "WASH-1400" [228] группы профессора Н.Расмуссена о безопасности коммерческих ядерных реакторов, завершено в 1975 году. После первого в целом благожелательного восприятия критика отчета со стороны научной общественности США стала нарастать. В начале февраля 1979 года национальный регулятор США в области ядерной безопасности (U.S. NRC) пришел к выводу, что метод логико-вероятностного моделирования (ЛВМ) для управления радиационной безопасностью слишком произволен и не может быть рекомендован к применению, причем основной упрек заключался именно в чрезмерной неопределенности результатов КОР.

Происшедшая вскоре после этого разгерметизация реактора на атомной электростанции "Three Mile Island-2" заставила U.S. NRC вновь радикально пересмотреть свою позицию, поскольку выяснилось, что цепь имевших место аварийных событий ранее была предсказана в отчете Н.Расмуссена [228].

Между тем сильные стороны риск-методологии очевидны. Так, Руководство по количественной оценке риска химических производств [173] отмечает, что достоинства методологии анализа риска заключаются не только в получении количественных оценок некоторых целевых метрик риска, но и в способствовании лучшему пониманию природы опасностей, их количественному выражению. В США, где риск-методология начала применяться существенно раньше, чем в России, U.S. NRC еще в 1995 году пришел к выводу, что логико-вероятностное моделирование следует считать важным дополнением к традиционному надзорному методу управления ядерной безопасностью.

Следует подчеркнуть, что важнейшей заслугой методологии анализа и управления пожарным (аварийным) риском перед наукой является сама постановка проблемы количественной оценки неопределенности (КОН) результатов, полученных расчетным путем. Если в экспериментальных естественнонаучных исследованиях указание интервала

неопределенности результатов измерений давно стало научным стандартом и рутинной, то для теоретической науки это пока еще не так. Между тем, поскольку любое математическое моделирование, что называется, с необходимостью сопряжено с неопределенностью, постольку точечная форма представления его результатов может рассматриваться лишь как грубое (нулевое) приближение, [40].

Постановка проблемы неопределенности параметров аварийного риска впервые была выполнена группой профессора Н.Расмуссена. Еще перед началом работы над отчетом "WASH-1400", в 1972 году, этой группой было осознано наличие неопределенности, тогда же была поставлена задача разработки методов ее количественной оценки. Как следует из главного отчета [228] и приложений к нему [229 – 232], для разных параметров эта задача была решена с различной степенью успешности.

Впоследствии, уже в другой области техногенного риска – риска экологического – специально созданный решением конгресса США Совет национальной академии наук (НАН) пришел к заключению, что проблема существования и количественной оценки неопределенности является ключевой для данной методологии, [239]. Сложность проблемы оказалась столь незаурядной, так что и спустя 25 лет тот же Совет в своем отчете [238] (2009 г.) констатировал, что эта проблема проявила себя как настоящий "крепкий орешек", она сохранила свою первостепенную важность для анализа и количественной оценки риска.

Актуальность проблемы существования неопределенности результатов КОР и поиска путей ее уменьшения была подтверждена серией специальных сравнительных экспериментов "bench mark studies", проведенных в конце прошлого века под эгидой Европейского Союза.

В нашей стране проблема существования неопределенности параметров аварийного и пожарного рисков и способы ее количественной оценки не так популярна, как за рубежом, где ей ежегодно посвящаются десятки научных публикаций, выходят специальные научные журналы: "International Journal for Uncertainty Quantification", "Journal of Uncertainty Analysis and Applications", "SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification" и др.

Некоторые методические вопросы КОИ неоднократно рассматривались на страницах отечественного журнала "Безопасность труда в промышленности", в том числе – в полемических статьях, например, [30], [31], [57].

### **Степень разработанности темы исследования**

Наибольшей проработанностью проблемы КОИ отличаются "цветные" книги (CPR-12E, CPR-18E) нидерландской организации прикладных исследований (TNO), Руководство по количественной оценке риска в химической промышленности американского

института инженеров-химиков (AIChE), документы по ядерной безопасности США (NUREG-1855, RG 1.174, ASME/ANS RA-Sa-2009 и др.), отчеты SANDIA NL.

В литературе по данной теме показано, что в инженерной практике встречаются качественные, полуколичественные и количественные подходы к оценке неопределенности, присущей параметрам риска. Качественные методы полезны для лучшего понимания происхождения и источников неопределенности. Полуколичественные методы в основном сводятся к использованию т.н. фактора неопределенности (UF), обычно составляющего  $2 \div 100$ , с помощью которого грубо оценивают диапазон величины показателей риска.

Для количественного оценивания неопределенности параметров риска использовались как вероятностные, так и детерминированные методы. Первый способ реализуется при статистическом моделировании (методом Монте-Карло и его модификаций – латинского суперкуба, цензурированных выборок и т.д.) после постулирования типа распределения вероятности. Второй способ используется в методах граничного анализа Скотта Ферсона; нечетких чисел; чисел, наделенных правдоподобием; интервального анализа. В последнее время предложено множество гибридных методов, объединяющих оба этих подхода.

Наиболее часто для целей КОР используется вероятностный подход. Интервальные методы, рекомендуемые некоторыми Руководствами по КОР, в настоящее время не находят применения, по-видимому, из-за привносимой ими дополнительной вычислительной неопределенности. Если в процессе расчетов не принимать мер по ее подавлению, ширина интервалов показателей риска обычно становится столь значительной, что результаты расчета теряют всякий практический смысл.

### **Цель и задачи работы**

Целью диссертационного исследования являлась разработка научных основ методов анализа и количественной оценки неопределенности при моделировании аварий на взрывопожароопасных объектах (ВПОО) нефтегазовой отрасли и ее использование в методе количественной оценки и управления аварийным риском.

Для достижения поставленной цели следовало решить следующие задачи:

1 На базе подходов к оценке пожарного риска и риска аварий, рекомендуемых действующими Руководствами МЧС России и Ростехнадзора, соответственно, разработать этапы общего алгоритма количественной оценки аварийного (пожарного) риска (КОР).

2 Для каждого ее этапа, проанализировав действующие Руководства по КОР и МЧС России и Ростехнадзора, выявить имеющиеся источники неопределенности терминологического, модельного и параметрического типов. Получить в результате перечень источников неопределенности действующей отечественной нормативно-методической

базы КОР, порождающих неопределенность метрик аварийного (пожарного) риска ВПОО нефтегазовой отрасли и сформировать предложения по их устранению.

3 Изучить возможность выполнения КОР в интервальной постановке (методами интервального анализа) с принятием мер по подавлению дополнительной вычислительной неопределенности интервальных вычислений.

4 Изучить возможность оценки параметрической чувствительности (значимости параметров) физико-математических моделей, используемых для расчета параметров аварий на ВПОО нефтегазовой отрасли в рамках интервального подхода.

5 Разработать метод наиболее полной количественной оценки и управления аварийным риском, позволяющий, наряду с учетом всех возможных вариантов возникновения аварий на ВПОО нефтегазовой отрасли, сценариев их дальнейшего развития, составляющих полного ущерба, получить количественную оценку неопределенности результата (целевой метрики риска).

6 Выполнить апробацию интервально-матричного метода на нескольких взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли, на которых обращаются горючие вещества разного типа: легковоспламеняющаяся жидкость, сжиженный углеводородный газ, компримированный природный газ.

7 Разработать метод нормирования интервальных значений целевых показателей аварийного (пожарного) риска.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается в следующем:

1 Разработана и обоснована новая классификация источников неопределенности процедуры количественной оценки аварийного риска путем добавления нового типа вычислительной неопределенности и шести подтипов, позволившая выявить источники неопределенности отечественной нормативно-методической базы данной процедуры для взрывопожароопасных объектов, вызывающие значительный разброс результатов оценки риска при ее выполнении в традиционной дискретной постановке; разработаны меры, позволяющие эту неопределенность уменьшить.

2 Параметры аварийного риска взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли впервые рассчитаны в рамках интервального анализа методами Р.Мура, глобальной оптимизации и аффинного представления параметров, что позволило минимизировать значительную вычислительную неопределенность (уширение интервальных чисел – результатов расчета), сопровождающую классические интервальные вычисления, из-за которой подобные вычисления прежде не имели практического смысла.

3 Впервые разработан интервально-матричный метод количественной оценки аварийного риска взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли, позволяющий

эффективно управлять риском на всех стадиях жизненного цикла этих объектов через сравнение результатов расчета риска для альтернативных проектных решений, в отличие от вычисления аварийных рисков в традиционной дискретной постановке, не учитывающей наличие параметрической неопределенности.

4 Для целей управления риском ранжирование параметров физико-математических моделей аварийных процессов на взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли по величине их значимости впервые выполнено в интервальной постановке, что значительно быстрее традиционного способа решения этой задачи в вероятностной постановке (методами статистического моделирования).

5 На примере взрывопожароопасного объекта "Резервуар с ЛВЖ" показано, что максимальные значения поражающих факторов некоторых сценариев аварии ("Объемный взрыв паров", "Пожар-вспышка"), полученные в рамках консервативного подхода методом глобальной оптимизации в интервальной постановке, на 10 – 30% превосходят по величине аналогичные значения, рассчитанные в традиционной дискретной постановке, что обусловлено свойством немонотонных функций достигать экстремальных значений необязательно на границах их области определения.

6 Разработан метод улучшения оценок параметров аварийных процессов на взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли, рассчитанных по соответствующим физико-математическим моделям в рамках интервального анализа, при наличии статистической информации о величине входных параметров этих моделей.

7 По аналогии с утвержденным МАГАТЭ методом нормирования радиационной безопасности продуктов питания, учитывающего наличие измерительной неопределенности у величины их удельной активности, впервые предложен метод нормирования интервальных значений целевых показателей аварийного (пожарного) риска.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что разработанные в ней научные основы методов анализа и количественной оценки неопределенности при управлении аварийным риском, выявляя источники неопределенности действующей отечественной нормативно-методической базы КОР и учитывая наличие параметрической неопределенности в используемых физико-математических моделях взрывов и пожаров, позволяют совершенствовать риск-ориентированный подход к управлению пожарной и промышленной безопасностью ВПОО нефтегазовой отрасли. В рамках риск-ориентированного подхода процесс управления пожарной или промышленной безопасностью ВПОО нефтегазового отрасли заключается в том, что на любой стадии жизненного цикла этих объектов, разработке для них обоснований промышленной безопасно-

сти или специальных технических условий выбирается то альтернативное проектное решение, которому соответствует минимальный по величине рассчитанный целевой показатель аварийного (пожарного) риска. Этот целевой параметр вычисляется разработанным в диссертации интервально-матричным методом, учитывающим наличие параметрической неопределенности, что делает процесс выбора проектного решения (управления риском) максимально реалистичным и информационно обеспеченным.

Практическое значение результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1 Использование разработанного в нем интервально-матричного метода оценки аварийного (пожарного) рисков, включающего оценку неопределенности результата, позволяет более обоснованно осуществлять выбор альтернативных решений на проектной стадии, при разработке защитных мероприятий, специальных разделов проектной документации, обоснований промышленной безопасности, специальных технических условий (СТУ) для ВПОО нефтегазовой отрасли. В частности, это использовано Проектным институтом "Союзхимпромпроект" ФГБОУ ВПО "КНИТУ" при разработке проектной документации:

- реконструкции производства галлобутилкаучуков (расширении сливо-наливных терминалов);
  - производство метилхлорсиланов ОАО "КЗСК-Силикон";
  - строительстве цеха короткоциклового адсорбции ОАО "Казаньоргсинтез";
- а также ООО "Эксперт-бюро" – при разработке проектной документации для ряда опасных производственных объектов нефтехимической отрасли.

2 Устранение источников неопределенности существующего методического обеспечения количественной оценки аварийного (пожарного) риска, обнаруженных в результате исследования, позволит усовершенствовать методы: а) управления риском объектов нефтегазовой отрасли; б) прогнозирования поражающих факторов взрывов и пожаров при авариях на данных объектах, в) оценки причиняемого им ущерба.

3 Федеральным государственным бюджетным учреждением "Всероссийский научно-исследовательским институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям" принято решение о разработке национального стандарта ГОСТ Р 22.X.XX-201X БЧС. Метод расчета техногенного риска с интервальной оценкой неопределенности его параметров, основанного на положениях четвертой главы диссертации.

### **Методология и методы исследования**

Прогнозирование параметров аварий на взрывопожарных объектах нефтегазовой отрасли осуществлялось в рамках сценарного подхода методами логико-вероятностного моделирования.

Использование комбинированных диаграмм типа "галстук-бабочка" (ДГБ) позволило выполнить оценку вероятности и масштаба головного события аварии, условные вероятности и величину поражающих факторов при различных сценариях развития аварийного процесса.

Учет вариативности головного события аварии и событий правой части ДГБ потребовал задания величины их параметров матрицами, которые из-за наличия параметрической неопределенности являлись интервальными.

С целью минимизации дополнительной вычислительной неопределенности, присущей методам интервального анализа, при выполнении расчетов применялись методы Рамона Мура, глобальной оптимизации и аффинное представление интервальных чисел. В учете термодинамической связности ряда параметров задачи в некоторых случаях использовалась комбинация вышеуказанных методов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1 Научные основы метода анализа и количественной оценки неопределенности аварийного риска взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли.

2 Классификация и перечень основных источников неопределенности всех этапов процедуры количественной оценки аварийного (пожарного) риска, регламентированной в отечественно нормативно-методической базе.

3 Оценивание параметров аварий на взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли методами интервального анализа (в интервальной постановке), с принятием мер по минимизации вычислительной неопределенности интервальных вычислений, позволяющей выполнить:

- а) непосредственную количественную оценку неопределенности результатов расчета;
- б) быструю оценку значимости параметров используемых физико-математических моделей аварийных процессов;
- в) оценку консервативности принимаемых допущений.

4 Интервально-матричный метод количественной оценки и управления аварийным (пожарным) риском взрывопожароопасного объекта нефтегазовой отрасли, результатом которого является комплексный целевой показатель (метрика) в виде интервального числа, содержащий количественную оценку неопределенности полученного результата.

5 Способ улучшения результатов интервального расчета (сужения интервалов) параметров аварийного (пожарного) риска при наличии статистической информации о поведении величины входных параметров физико-математической модели аварии внутри диапазонов их изменений.

6 Результаты апробирования разработанного интервально-матричного метода КОР на пяти взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли (складе светлых нефтепродуктов, насосной, погрузочно-разгрузочной эстакаде, технологическом блоке газораспределительной станции и автомобильной газозаправочной станции), позволившие ранжировать их по величине целевого показателя аварийного риска.

7 Метод нормирования целевых показателей аварийного (пожарного) риска, выраженных интервальными числами, разработанный по аналогии с методом нормирования радиационной безопасности продуктов питания, рекомендованным МАГАТЭ, учитывающим наличие измерительной неопределенности у показателей удельной активности.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов доказывается использованием для получения количественных оценок аварийного (пожарного) риска логико-вероятностного моделирования аварий, физико-математических моделей горения и взрыва, рекомендованных отечественными Руководствами по КОР, методов интервального и матричного анализа, выполнением интервальных вычислений с помощью программного кода INTLAB<sup>®</sup> версии 10.2, являющегося интервальным приложением к MATLAB.

Результаты работы докладывались и обсуждались: на международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы современных наук", Przemysl, 14 – 15 июня 2012 г.; научно-практической конференции "Приоритетные направления развития науки в области управления рисками на современном этапе", Москва, 22 октября 2013 г.; V-й международной научно-практической конференции "Пожарная безопасность: проблемы и перспективы", Воронеж, 18 – 19 сентября 2014 г.; Twelfth international scientific school "Modeling and analysis of safety and risk in complex systems" (MA SR – 2014). Санкт-Петербург, 18 – 20 ноября 2014 г.; заседании научно-технического совета при Министерстве по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям Республики Татарстан. Казань, 18 февраля 2015 г.; XX-й международной научно-практической конференции "Глобальная и национальная стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий". Москва, 19 – 21 мая 2015 г.; Всероссийской научно-практической конференции "Анализ риска – 2015: проблемы теории и практики". Йошкар-Ола, 27 мая 2015 г. Всероссийской научно-практической конференции "Человек, общество и государство в обеспечении безопасности жизнедеятельности современной России". Москва, 23 октября 2018.

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Рукопись диссертации изложена на 333 страницах машинописного текста, содержит 20 рисунков и 99 таблиц, список использованной литературы состоит из 253 источников.

*Глава 1* посвящена библиографическому обзору современного состояния дел в области трактовки соотношения понятий "неопределенность" и "риск", понимания природы и основных источников неопределенности параметров техногенного риска, качественному анализу и методам количественной оценки этой неопределенности. Как известно, экологический риск оценивает загрязнение окружающей среды двух типов:

- а) систематическое загрязнение в нормальных, штатных режимах работы технологических объектов;
- б) аварийное загрязнение, заключающееся в выбросе (сбросе) опасных веществ вследствие аварии.

В свою очередь, совместной объектной областью пожарного и аварийного рисков являются аварии на взрывопожароопасных объектах.

Природа и источники неопределенности экологического и аварийного рисков в целом совпадают, хотя имеется и ряд отличий.

Показано, что используемое в науке и теории риска понятие "неопределенность" имеет двойкий смысл – качественный и количественный.

В главе проанализирована история: а) постановки проблемы количественной оценки неопределенности параметров риска; б) разработки методов ее выполнения. Исследованы методы получения качественных, полуколичественных и количественных оценок неопределенности. Показано, что к настоящему времени проблема КОН аварийного риска наиболее успешно решена в области ядерной безопасности США, где спектр применяемых технических устройств и видов возможных аварий относительно узок.

*В главе 2* диссертации проанализированы источники неопределенности, возникающие на всех этапах процедуры КОР взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли. Предложена новая классификация источников неопределенности, включающая четыре ее типа, причем модельный и параметрический типы включают по три подтипа.

Выполнен сравнительный анализ алгоритмов КОР, рекомендуемых нормативными документами МЧС России и Ростехнадзора, в итоге выделено пять основных этапов процедуры КОР:

- первый – оценка параметров головного события аварии;

- второй – определение перечня сценариев аварии и оценка их условных вероятностей;
- третий – оценка величины поражающих факторов аварии;
- четвертый – максимально полная оценка всех видов ущерба от аварии в натуральном выражении;
- пятый – расчет денежного эквивалента всех составляющих полного аварийного ущерба.

Для каждого из них выявлены и проанализированы источники неопределенности терминологического, модельного и параметрического типов.

*Глава 3* содержит результаты оценки параметров аварийного риска интервальным методом. Показано, что наиболее универсальной формой математического представления параметрической неопределенности является интервальное число. Интервальные вычисления выполнялись с помощью программы INTLAB версии 10.2, разработанной профессором З.М.Румпом. Важно отметить, что при выполнении интервальных расчетов принимались меры, направленные на минимизацию вычислительной неопределенности, обусловленной особенностями интервального анализа (аффинное представление интервальных чисел, методы Р.Мура и глобальной оптимизации). Во многих случаях с учетом термодинамической связности параметров аварии использовалась комбинация названных методов.

Все параметры используемых физико-математических моделей аварийных процессов были отнесены к одному из трех типов: природно-эксплуатационному, модельному или смешанному.

В целях апробации интервальной постановки задачи выполнена оценка целевых метрик сценариев взрывов (пожаров) на пяти ВПОО нефтегазового комплекса: резервуарном парке светлых нефтепродуктов; насосной светлых нефтепродуктов; сливо-наливной эстакаде светлых нефтепродуктов; автомобильной газозаправочной станции; технологическом блоке газораспределительной станции.

Логико-вероятностное моделирование аварий выполнено с использованием модифицированных графов, называемых диаграммами "галстук-бабочка" (ДГБ).левой частью ДГБ является дерево отказов (ДО), правой – дерево событий (ДС), в центре графа – головное событие (ГС) аварии. Головное событие и события правой части ДГБ были заданы интервальными матрицами.

Показано, что выполнение КОР в интервальной постановке позволяет выполнить прямую оценку значимости параметров (параметрической чувствительности) использованных физико-математических моделей аварийных процессов. Кроме того, в главе про-

демонстрировано, что "консервативный" подход к оценке аварийного риска в традиционной точечной постановке на деле не является по-настоящему консервативным, поскольку получаемые с его помощью значения риска не всегда являются наибольшими. В отличие от него, метод глобальной оптимизации в интервальной постановке гарантированно находит все экстремумы целевой функции в области ее определения.

В главе 4 представлен интервально-матричный метод наиболее полной оценки аварийного риска, учитывающий все варианты головного события аварии, возможные сценарии ее развития и составляющие полного ущерба, подлежащие учету согласно используемому Руководству по КОР. Параметры аварии и объектов-мишеней, попадающих в область поражения аварии, в нем заданы интервальными матрицами. Результат расчета – целевая метрика аварийного риска – является интервальным числом, полученным в результате свертки соответствующих интервальных матриц. Метод апробирован на примере оценки аварийного риска пяти взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли.

В завершении главы предложен метод нормирования интервальных метрик аварийного риска.

Автор хотел бы поблагодарить своего научного консультанта профессора Эдуарда Шархиевича Телякова за ценные советы и большую организационную помощь, оказанную ему в течение всего времени работы над диссертацией.

Кроме того, автор выражает свою признательность Ярошенко Константину Владимировичу (Красноперекоск, Крым) и Алексею Шарпанских (Технологический Университет Дельфта, Нидерланды) за содействие в поиске литературы по теме диссертации в части публикаций на английском языке.

## ГЛАВА 1 ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ

### 1.1 Неопределенность: качественный и количественный аспекты

Понятие "неопределенность", несомненно, стало использоваться в науке намного раньше, нежели понятие "риск", [48]. Однако именно теории техногенного риска мы обязаны тем, что неопределенность, подобно экспериментальным исследованиям, приобрела количественный аспект также и теоретической области. Этот новый подход сулит существенное расширение горизонтов применения данного понятия, [49].

Понятие "риск" в настоящее время еще не обрело канонического толкования, при этом широко используется в целом ряде отраслей науки – от теории безопасности до экономической теории, в каждой из них имея свою трактовку.

Теоретическим базисом современной техногенной безопасности является теория (анализ) техногенного риска (АТР) – научная область, стремящаяся к стандартам естественно-научной дисциплины. В то же время чрезвычайная сложность предмета этой науки – негативных процессов в технологических системах – как из-за отсутствия точной информации, так и нехватки удовлетворительных теоретических моделей, вынуждает в ряде случаев прибегать к использованию экспертных суждений и оценок. Использование подобных методов, находящихся вне рамок естествознания, не позволяет многим специалистам относить АТР к области "hard science" (классической науки).

Теория техногенной безопасности (от греч. τέχνη – искусство, умение; γένεσις, γένεση – происхождение, возникновение; т.е. дословно – порожденной техникой) изучает опасные факторы и обусловленные ими негативные последствия, связанные с использованием технологий, функционированием технических объектов и систем, [48]. Это опасности двух видов:

а) с одной стороны, они заключаются в систематическом загрязнении (химическом, физическом и биологическом) среды обитания человека, а также ее видоизменении. Указанные процессы происходят в нормальных, штатных режимах работы технических объектов, а создаваемые ими уровни загрязнения хотя и относительно невелики, но, тем не менее, оказывают на экосистемы негативное хроническое воздействие. Подобные процессы техногенного происхождения изучает теория экологического риска;

б) с другой стороны, техногенные опасности могут быть представлены возможными авариями на опасных производственных объектах, сопровождающимися выбросом опасных веществ, взрывами и пожарами, токсичным поражением людей и объектов биосферы. Уровень сопутствующего авариям загрязнения окружающей среды обычно

существенно выше. Опасности подобного рода исследуются и оцениваются теорией аварийного риска.

В теории экономического (финансового, инвестиционного, страхового) риска понятие "неопределенность" используется исключительно в качественном смысле. В теории анализа аварийного риска это не так:

- с одной стороны, неопределенность, с учетом основной задачи науки (получения максимально полного и точного априорного знания) – это *качественная* характеристика такого состояния знаний о предмете исследования, для которого характерны недостаточное понимание основных действующих факторов и закономерностей их проявления, недостаток и/или неоднозначность имеющейся информации об особенностях ситуации или технической системы. Подобное состояние знаний не позволяет адекватно и с приемлемой точностью описать, смоделировать и, в конечном счете, предсказать поведение изучаемого объекта, развитие ситуации во времени и пространстве;

- с другой стороны, учитывая, что важнейшим этапом анализа техногенного риска является получение количественных значений важнейших параметров задачи путем выполнения расчетов по определенным физико-математическим моделям, а также привлечения экспертных суждений, неопределенность параметров риска используется как *количественная* мера возможного разброса полученных значений. Этот разброс определяется тем, что: а) привлекаемые физико-математические модели взрывов и пожаров обладают ограниченной точностью; б) время их начала заранее не известно (если только это не диверсия), поэтому невозможно точно задать величину важнейших параметров задачи (метеорологические условия, энергетический потенциал аварийного выброса, местоположение персонала и подвижных объектов на территории опасного объекта и т.д.).

Следовательно, неопределенность является атрибутом, т.е. неотъемлемым свойством любого параметра, характеризующего риск. В силу этого результаты количественной оценки аварийного риска (КОР) в подавляющем большинстве случаев будут являться не точечным значением, а некоторым интервалом, характеризующим диапазон возможных значений, которые обоснованно могут быть ему приписаны. Подобный интервал в современной метрологии принято характеризовать величиной неопределенности, [48]. Таким образом, количественный аспект неопределенности в теории АТР в целом соответствует трактовке неопределенности результатов измерений в современной метрологии (измерительной неопределенности). Последняя характеризует диапазон значений, который "обоснованно может быть приписан измеряемой величине", [185]. В целом в современной метрологии понятие неопределенность также используется в обоих смыслах, [48].

Таким образом, с учетом генеральной задачи теории техногенного риска – разработки инструментария для максимально возможной объективизации оценивания опасностей всякого рода и разработки мер по их уменьшению – неопределенность должна получить количественное выражение, [49].

При выполнении АТР риск-аналитик пользуется всей суммой доступной ему информации:

- о свойствах изучаемой технической системы;
- моделях развития во времени и пространстве физических процессов, сопровождающих нештатное (аварийное) высвобождение опасных веществ и/или энергии;
- расположении в момент аварии относительно исследуемого опасного объекта (ОО) потенциальных объектов поражения (объектов-мишеней).

Необходимые количественные оценки он выполняет, либо – используя справочные данные, либо – выполняя расчеты по моделям, либо – экспертно, опираясь на собственную интуицию или формальные рассуждения. В любом случае получаемые численные оценки параметров задачи только кажутся точными. На самом деле они являются лишь меткой (маркером) интервала, в котором в действительности находится истинное значение величины.

Приведенные соображения о перманентной неопределенности результатов количественной оценки аварийного риска неоднократно подтверждались на практике. Многолетний опыт применения методологии КОР как в странах Старого и Нового света, так и в России, показал, что результаты, полученные различными исполнителями при идентичных исходных данных, часто различались весьма существенно. Это означает, что требование *воспроизводимости* научных результатов (важнейшее для естественных наук) в области КОР не выполняется. Это побудило интерес к более тщательному изучению данного феномена. Неоднократно проводились специальные сравнительные исследования, получившие название *bench mark studies*, в ходе которых большие различия результатов оценки риска были подтверждены, [220].

Анализ показывает, что подобные различия не только не являются экзотикой, но, напротив, очень типичны для результатов КОР. Обратимся к такому на первый взгляд однородному объекту, как магистральный газопровод. Статистика числа аварий, происходящих на 1000 километров длины такого трубопровода, свидетельствует, что удельный показатель (число аварий/тысячу км·год) весьма сильно варьирует как во времени, так и в пространстве, поскольку зависит от большого числа факторов, [97]:

- географических особенностей района расположения;
- плотности населения;

- компании-изготовителя;
- возраста трубопровода;
- конструкции трубы (прямо- или спиральношовная);
- марки стали и др.

В результате, согласно данным раздела 3.5 [97], этот показатель за период 2003 – 2009 гг. по ОАО "Газпром" в целом колебался в диапазоне от 0.09 до 0.18 аварий/тысячу км·год. В территориальном разрезе по различным регионам России его изменчивость оказалась существенно выше и по итогам эксплуатации за 13 лет (с 1991 по 2002 гг.) она превысила порядок величины, [52].

По мнению многих авторитетных организаций и специалистов, в настоящее время именно проблема количественной оценки неопределенности (КОН) в теории АТР остается ключевой. Можно сослаться, например, на отчет специализированного комитета Американской национальной академии наук, [238], посвященный анализу состояния дел и выработке предложений по дальнейшему развитию методологии анализа экологического риска, [52]. Серьезная критика со стороны научной общественности результатов пионерных исследований в области техногенного риска:

а) отчета о безопасности коммерческих атомных реакторов "WASH-1400", выполненного под научным руководством профессора Н. Расмуссена (Rasmussen);

б) оценок экологического риска, обусловленного систематическим техногенным загрязнением среды обитания, полученных в ходе исследований по программе американского Агентства по защите окружающей среды (US EPA);

касалась в основном именно их чрезмерной, по мнению критиков, неопределенности. Следует отметить, что подобные критические замечания были обоснованными, с чем, собственно, были согласны и сами авторы указанных исследований, [52].

Важно отметить, что уже на первом этапе отечественных исследований в области АТР ведущими российскими специалистами подчеркивалась необходимость КОН. Так, российский Объединенный комитет по управлению риском государственных научно-технических программ в 1995 году полагал, что риск следует представлять векторной величиной, компонентами которой являются вероятность события, обусловленный им ущерб и неопределенность того и другого, [38].

В заключении отметим, что полученные в рамках методологии риск-анализа результаты относительно методов анализа источников неопределенности и способов ее количественной оценки имеют общенаучное значение. Нет сомнения в том, что КОН результатов любого моделирования в будущем, пожалуй, даже и не столь отдаленном, станет его неотъемлемой составной частью. По-видимому, уже в ближайшей перспективе научный

стандарт делает обязательным сопровождение любого численного значения, полученного теоретическим расчетом, количественной оценкой неопределенности – подобно тому, как это давно уже является нормой в экспериментальных исследованиях, [49].

## 1.2 Краткая история развития научных представлений о риске и неопределенности

Ретроспективное рассмотрение трактовки понятий "риск" и "неопределенность" начнем с более широкого, общенаучного контекста. Неплохой обзор данного вопроса приведен в статье С.Самсон (Samson), Дж.Ренеке (Reneke) и М.Вичек (Wiesek), [216], опубликованной в 2009 году. Авторами проанализированы 34 работы по данной теме, опубликованные, начиная с 1901 года. В результате ими классифицировано несколько точек зрения, образующих целый спектр мнений относительно толкования этих понятий. Так, имеется большая группа исследователей (в основном работающих в области экономических наук), полагающих, что риск и неопределенность практически тождественны, [48]

На рисунке 1.1, заимствованном из данной статьи, схематично изображены различные толкования соотношения этих двух понятий.

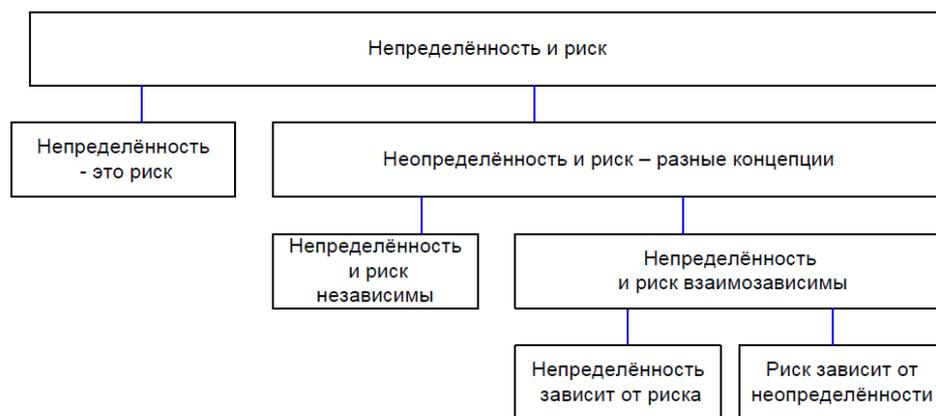


Рисунок 1.1 – Соотношение между понятиями неопределенность и риск, [216]

Приведем типичные определения, даваемые представителями данного направления:

1) Мейр и Каммак (Mehrg & Cammack) "риск определяется как неопределенность. Он связан с неопределенностью финансовых потерь и вообще любого ущерба, причиной ущерба и его вероятностью. Риск принципиально связан с неопределенностью ущерба... Степень риска измеряется возможными отклонениями фактических значений [ущерба] от ожидаемых. Чем ниже отклонение в процентном отношении, тем меньше риск" [199], цит. по [216];

2) Филипп (Philippe) в своей монографии определяет риск как "неопределенность исходов. Риск является наилучшей мерой в терминах функции плотности вероятности". Филипп предлагает также параметр, называемый им ценой риска (VaR). "VaR измеряет наихудший ожидаемый ущерб сверх обычного уровня при нормальных рыночных условиях при заданном уровне доверия. Например, банк может утверждать, что ежедневный VaR его кредитного портфеля составляет 35 миллионов долларов при доверительной вероятности 99%. Иными словами, имеется лишь один шанс из 100, что в условиях нормального рынка его потери превысят 35 миллионов долларов" [210], цит. по [216].

Самая первая трактовка неопределенности и риска, которую С.Самсон с соавторами удалось обнаружить в литературе, датирована 1901 годом. Это докторская (PhD) диссертация экономиста Виллета (Willett), в которой тот определил риск как "объективизированную неопределенность касательно появления нежелательного события" [244], цит. по [216]. Далее Виллет пишет, что риск может быть количественно оценен вероятностными средствами. По его мнению, субъективная неопределенность является следствием несовершенного знания. Виллет четко разграничивает понятия *риск* и *неопределенность*, поясняя свое мнение следующим примером: неопределенность является наибольшей в случае, когда вероятность равна 1/2.

Двадцать лет спустя была опубликована работа известного экономиста Ф.Найта (Knight) (русский перевод [66]), в которой им впервые разграничены качественный и количественный аспекты неопределенности. А именно – риск трактуется как количественно измеряемая, или измеримая (quantifiable) неопределенность, а не допускающая количественной оценки, неизмеримая неопределенность – как просто неопределенность. Ф.Найт полагал, что: "неопределенности должны толковаться в смысле, радикально отличном от привычного понятия риска... Это будет касаться того, что термином риск мы будем обозначать измеримую неопределенность, при этом он не будет применяться в отношении неизмеримой неопределенности. Мы, соответственно, ограничим использование термина неопределенность только случаями неколичественного типа. Практическая разница между категориями "риск" и "неопределенность" заключается в том, что в первом случае распределение результатов внутри группы [возможных исходов] известно, в то время как в случае неопределенности это не так. Вообще говоря, во втором случае невозможно создать группу исходов, поскольку рассматривая ситуация в высшей степени уникальна" [66].

Другой известный экономист, Кейнс (Keynes) определяет неопределенность следующим образом: "что касается неопределенности ... по моему мнению, следует отличать, то, что известно наверное, от того, что представляется только вероятным... Отно-

сительно этих вопросов [неопределенности] нет каких-либо научных оснований для вычисления вероятности. Мы просто не знаем", [192], цит. по [216].

Подобным образом неопределенность трактуют ряд представителей отечественной экономической мысли. Например, С.А.Смоляк пишет, что в процессе исследования инвестиционного риска возникает некоторая неопределенность, под которой он понимает: "неполноту и неточность информации об условиях реализации проекта". А под риском он понимает "возможность возникновения условий, приводящих к негативным последствиям проекта для его участников", [102]. Схожей точки зрения придерживаются О.В.Беспалова, [7], авторы [64].

Аналогично трактует неопределенность Линдли (Lindley), как характеристику ситуации, информация о которой недостаточна: "все в будущем, большая часть событий прошлого, даже настоящее содержит немалую долю неопределенности, благодаря нашему незнанию неопределенность везде вокруг нас", [197].

Немалое число предстателей гуманитарного знания полагают, что неопределенность и риск – суть различные понятия, при этом в отношении их взаимосвязи мнения существенно расходятся – одни исследователи считают, что между ними вообще нет никакой связи, другие – что риск определяется неопределенностью задачи, третьи, наоборот, уверены, что неопределенность зависит от риска. Так, например, по мнению Пфедфера (Pfeffer): "риск – это состояние Мира, неопределенность – состояние ума. Риск и неопределенность – это противоположные части одно и того же: одно понятие измеряет объективную вероятность, другое – субъективную степень веры" [209], цит. по [216].

Точка зрения о том, что неопределенность зависит от риска, представлена Кроувом (Crowe) и Хорном (Horn). Эти авторы заключают, что "концепция риска – это преимущественно объективный феномен и нет смысла идентифицировать неопределенность, которая является состоянием ума... Тем не менее, риск и неопределенность тесно связаны, поскольку риск часто порождает неопределенность" [152], цит. по [216].

Противоположного мнения придерживается, например, Атерн (Athearn), который утверждает, что "риск – это неопределенность, а методы анализа риска, имеющиеся в литературе, могут быть успешно использованы обращения с неопределенностью. Но тогда ясно, что только анализа риска недостаточно для решения проблемы неопределенности". Поэтому он делает вывод, что неопределенность не может быть риском и определяет риск следующим образом: "риск может быть определен, либо как "ожидаемая вероятность ущерба (потерь)"; либо как "возможность неблагоприятного отклонения от ожидаемого значения, т.к. любое отклонение в неблагоприятную сторону от ожидаемого означает убытки" [138], цит. по [216].

Приведенные трактовки понятий неопределенности и риска принадлежат в основном представителям экономического сословия в науке, а также другого ее направления, которое авторы [216] назвали "исследованием операций". Большое число публикаций последнего времени посвящено неопределенности инвестиционного риска, а также риску, сопряженному с принятием управленческих решений в условиях неопределенности, [8].

Чтобы лучше понять современное понимание соотношения между техногенным риском и неопределенностью, рассмотрим, как формировались (и трансформировались) научные представления об этих понятиях. По мнению известного исследователя истории и методологии риск-анализа Ортвинна Ренна (Renn), точно датировать зарождение анализа техногенного риска как научного направления, сложно, [87]. На этот счет существует несколько точек зрения: а) одни авторы указывают на работу Чаунси Старра (Starr) [218], опубликованную в "Science" в 1969 году и посвященную сравнительному статистическому анализу гибели населения США в различных областях деятельности, б) другие полагают, что в начале был отчет "WASH-1400" [228].

Между тем сами авторы "WASH-1400" ссылаются на приоритет более ранних работ (в частности, по использованию метода деревьев отказов), проводившихся NASA в течение предшествующего десятилетия...

В силу идеологических причин в странах социалистического блока исследования в области теории техногенного риска, допускающей возможность аварий на технических объектах, были невозможны вплоть до второй половины 80-х годов прошлого века. В этих странах безраздельно господствовала парадигма абсолютной безопасности и детерминистические методы управления безопасностью. Тем временем в США и странах Европейского союза были развиты иные подходы к анализу и управлению промышленной и пожарной безопасностью: а) сценарный подход; б) логико-вероятностное моделирование; в) методы экспертного оценивания (мозговой штурм, итеративный метод Дельфи и др.), [48]. Совершенно естественно, что наибольшее развитие эти методы получили в таких областях, как:

- авиация и ядерная энергетика – в США;
- химическая промышленность – в Европейском Союзе и США,

т.е. там, где эксплуатировались наиболее сложные технические системы с большим энергетическим потенциалом.

Достаточно интересно ознакомиться с полной драматизма историей развития данной методологии в изложении Роджера Кука (R.Cooke) [144], и Томаса Бедфорда (Bedford), [139]. Эти авторы повествуют об истоках методологии и методах анализа аварийного риска – таких, как групповые техники проведения опросов экспертов, сценарный

анализ, использование полуколичественных методов в оценивании тяжести последствий аварий и др. Так, метод мозгового штурма впервые активно был использован в рамках исследований, проводимых компанией Douglas совместно с RAND corporation в интересах американского министерства обороны. Позднее, в 50-х годах прошлого века, именно RAND разработала метод итеративного опроса экспертов, известный теперь как метод Дельфи. Между тем этот метод неоднократно подвергался серьезной критике, [144]:

1) Закман (Sackman) [215] показал, что результаты, полученные в результате опроса экспертов и непрофессионалов, обычно оказываются близки;

2) по мнению Густафсона (Gustafson) с коллегами [176], метод Дельфи, в сравнении с иными методами проведения экспертных опросов, дает наихудшие результаты;

3) Дельбек (Delbecq) с соавторами [154], сравнивая метод Дельфи с иными групповыми техниками, заключили, что он ничем среди них не выделяется.

По мнению Р.Кука, [144], сценарный анализ (ключевой элемент ЛВМ) был впервые разработан Германом Каном (Kahn), автором знаменитой "Термоядерной войны" [189].

Еще в середине 50-х годов в экспертном сообществе США использовались исключительно детерминистические методы анализа, в том числе методы hazard analysis, заключающиеся, как известно, лишь в расчете физических эффектов, сопровождающих техногенные аварии. В этом плане характерен отчет "WASH-740" [223] по безопасности ядерного реактора мощностью 200 МВт. Он был подготовлен в 1957 году по заказу Американского комитета по атомной энергии (U.S. AEC), предшественника US Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC). В части оценки вероятности аварий авторы отчета констатировали, что "ни сейчас, ни когда бы то ни было, едва ли кто-то будет в состоянии оценить вероятность столь редкого события, как разгерметизация ядерного реактора", [223].

Касательно интересующей нас проблемы следует отметить, что тема неопределенности получаемых результатов на том этапе развития методологии еще не затрагивалась. Между тем уже в 60-х годах прошлого века в NASA начали использовать вероятностные методы. Как полагают Т.Бедфорд и Р.Кук [139], именно трагические события 1967 года, когда пожар на космическом корабле "Apollo" привел к гибели трех астронавтов, дали старт систематическому применению логико-вероятностных методов в анализе техногенного риска.

Двумя годами позже, в 1969 году, в рамках работ по программе "Space Shuttle" NASA впервые сформировало группу по количественной оценке безопасности. Перед ней была поставлена задача обеспечить такой уровень надежности, чтобы вероятность гибели или ранения экипажа не превышала 1%, [139]. Именно этой группой впервые была предложена "матричная" интерпретация риска – разработана матрица риска, вклю-

чающая пять классов частоты события и четыре класса – размеров ущерба. Использование методологии LBM в NASA еще более усилилось после катастрофы космического челнока "Challenger" в 1986 году.

Наряду с развитием теории риска, в том числе – техногенного, проводились исследования в области оценки неопределенности. Малоизвестной для научной общественности является трактовка неопределенности разведывательными службами США. Как отмечает Р.Кук, [144], косвенно об этом можно судить по отчету [202], опубликованному в 1980 году. Американскими спецслужбами была разработана специальная таблица (kent chart) для перевода лингвистических оценок в балльные. Однако позже в разведывательном сообществе США перешли к непосредственному использованию полуколичественных оценок, [144].

Таблица 1.1 – *Рейтинг надежности и точности информации (Kent chart)*

Надежность источника		Точность информации	
Совершенно надежен	A	Подтверждена	1
По большей части надежен	B	Наверное, истинна	2
Довольно надежен	C	Возможно, истинна	3
Скорее ненадежен	D	Сомнительная истинность	4
Ненадежен	E	Маловероятна	5
Надежность не может быть оценена	F	Точность не может быть оценена	6

По общему мнению, первым по-настоящему полноценным исследованием в области техногенного риска с использованием методологии вероятностного моделирования техногенной безопасности стал отчет "WASH-1400", [228]. Его целью было получение реалистических оценок риска при эксплуатации коммерческих ядерных реакторов и сравнение их с рисками в неядерной отрасли. Работа была выполнена в течение трех лет коллективом, состоящим из более, чем восьмидесяти специалистов.

Для оценки вероятности головного события (выброса радиоактивности) использовался метод построения деревьев отказов (FTA – Fault Tree Analysis), изобретенный в 1962 году Bell telephone laboratories, а для оценки последствий – деревья событий. Серьезной новацией отчета стало использование в нем экспертных суждений – метода, известного еще с конца 40-х годов прошлого века. Экспертные суждения использовались для оценки величины параметров в тех случаях, когда нехватка информации не позволяла применять иные, более точные подходы.

Что касается проблемы неопределенности, то и в этом отношении отчет "WASH-1400" оказался новаторским. Именно в нем впервые в истории были выполнены количественные оценки неопределенности параметров риска, [239]. Уже при постановке задачи в августе

1972 года было принято a priori, что неопределенность, сопутствующая применяемым методам, вполне приемлема – настолько, что удастся получить результаты, вполне заслуживающие доверия. Хотя они отдавали себе отчет в том, что полученные ими оценки (особенно для вероятности столь редких событий, как разгерметизация активной зоны реактора) сопряжены с большой неопределенностью, [48].

Важный вывод, сделанный в ходе этой работы, касался выявленных слабых мест использованного в ее рамках метода ГТА, а именно – необходимости четкой идентификации возможных взаимосвязей между прогнозируемыми событиями. Если этого не сделать, полученные результаты будут содержать большую ошибку. С целью минимизации вызванной данным обстоятельством неопределенности приходилось уделять этому вопросу много времени, построив работу по итерационному принципу, с неоднократным возвращением к анализу одних и тех же событий.

Что касается количественных оценок неопределенности отчета "WASH-1400" в целом, то, как показывает анализ, ситуация здесь очень неоднородна – в тех редких его разделах, где имелась добротная статистика, корректная количественная оценка этой стохастической (aleatory) неопределенности не вызывает неприятия. Однако в подавляющем большинстве случаев неопределенность имеет эпистемическую природу, т.е. обусловлена недостаточностью и неточностью имеющихся знаний. В таких случаях КОИ либо не выполнялась совсем (нечастая ситуация), либо выполнялась с привлечением гипотез (например, о логнормальном распределении величины параметра). Иногда, достаточно редко, было выполнено сравнение результатов, полученных различными научными коллективами (bench mark), [48]. Количественные оценки неопределенности, генерируемой упрощениями используемых математических моделей, не выполнялись. Далеко не всегда выполнены количественные оценки параметрической неопределенности – во многих привлекаемых моделях использованы лишь точечные оценки параметров. Это и неудивительно, учитывая объем проделанной работы – впервые было предпринято столь всеобъемлющее исследование.

После опубликования отчета "WASH-1400" по решению конгресса США была создана специальная комиссия для его оценки под руководством авторитетного специалиста, профессора Льюиса (Lewes). Вердикт комиссии Льюиса в целом оказался комплиментарным – новаторская методология исследований была одобрена (в том числе – использование в отчете экспертных суждений). Хотя профессор Льюис и отметил, что, по его мнению, неопределенность расчетов недооценена, [139].

Между тем со временем критика отчета "WASH-1400" со стороны научной общественности США нарастала. В 1975 году Американское физическое общество опубликовало

достаточно критичный обзор данного отчета, зазвучали и другие отрицательные отзывы. В итоге к началу 1979 года позиция государственного регулятора США – U.S. Nuclear Regulatory Commission – радикально изменилась, он пришел к заключению, что в силу избыточной неопределенности оценки, получаемые в рамках ЛВМ, слишком ненадежны, поэтому метод ЛВМ не рекомендовался к дальнейшему применению.

Впору было ставить крест на данной методологии. Однако произошедшие вскоре драматические события марта того же года (разгерметизация реактора атомной электростанции "Three Mile Island-2"), заставили U.S. NRC вновь кардинально пересмотреть свою позицию, поскольку, как выяснилось, последовательность происшедших на ней аварийных событий была предсказана в отчете Н.Расмуссена, [139].

В 1981 году U.S. NRC выпустила Руководство по методу деревьев отказов (Fault Tree Handbook, [224]). Двумя годами позже U.S. NRC утвердила официальное Руководство по процедуре ЛВМ (PRA Procedures Guide), [226, 227], тем самым окончательно легализовав эту методологию, [139]. Согласно этому двухтомному Руководству следует различать три уровня детализации при выполнении ЛВМ:

Уровень 1: системный анализ. Исследуются события, связанные с аварийным выбросом и поступлением опасных веществ (химических или радиоактивных) в окружающую среду. При этом используются базы данных по надежности элементов технических систем, в том числе – человеческому фактору, строятся деревья событий. Выполняются количественные оценки последствий и количественный анализ неопределенности.

Уровень 2: анализ концентраций. На данном уровне исследований изучаются пути распространения вредных субстанций в биосфере с учетом таких важных параметров задачи, как зависимость мощности выброса от времени, физическая картина рассеивания выбросов (параметры источника, подстилающая поверхность и т.п.).

Уровень 3: анализ последствий. Изучение многосредовых путей поступления вредных субстанций в организм человека (через воздух, воду, пищу) с учетом токсикологических эффектов – как в краткосрочном, так и в долгосрочном планах. В этом Руководстве уже появился небольшой раздел "Анализ неопределенности", представляющий интерес лишь в постановочном плане.

Таким образом, уже в начале 80-х годов в США, впервые в мире, начато формирование нормативной методической базы по применению ЛВМ в области ядерной безопасности (количественной оценке риска), которое должно сопровождаться выполнением КОН.

С некоторым отставанием по отношению к рискам в сфере ядерной безопасности в США развивались исследования по проблематике экологического риска. Решением Конгресса США был создан специальный комитет Национальной академии наук – US NRC,

призванный координировать работу трех федеральных агентств, занимающихся проблематикой экологического риска, обусловленного использованием вредных веществ: US EPA, US OSHA, US FDA. Значительной вехой в развитии методологии экологического риска стал подготовленный этим комитетом в 1983 году первый отчет "Оценка риска под федеральным управлением", [237]. После скрупулезного анализа состояния дел авторы отчета констатировали, что основным препятствием на пути дальнейшего развития методологии является нерешенность проблемы количественной оценки неопределенности получаемых в ее рамках результатов, [48]. При изучении экологического риска в условиях острой нехватки знаний и информации исследователям приходилось прибегать к гипотезам экспертным суждениям, что неминуемо порождало неопределенность.

Согласно [155] в области оценки экологического риска до 1992 года преобладали консервативные оценки, риск оценивался по верхнему, наиболее опасному сценарию. В 1992 году US EPA выпустило Руководство [234], в котором было рекомендовано, наряду с верхней (консервативной), давать также и центральную (более реалистичную) оценку. Для задания величины интервала неопределенности был предложен "фактор неопределенности" UF, равный  $10 \div 100$ .

Серия происшедших в конце 1970-х – первой половине 80-х годов прошлого века крупных аварий на химических предприятиях (в Севезо, Бхопале, Мексико-сити) стимулировала проведение в США исследований в области техногенного риска, [174]. Центр по безопасности химической промышленности Американского общества инженеров-химиков (CCPS of AIChE) начал разработку серии Руководств по управлению безопасностью в химической промышленности. Первое издание "Руководства по процедурам оценки опасности" вышло в 1985 году (третье издание датировано 2008 годом). Второе и третье издания данного Руководства уже содержат разделы по КОР. В 1989 году CCPS of AIChE подготовил специальный руководящий документ [172], целиком посвященный количественному оцениванию риска в химической отрасли.

На другом континенте, в Старом свете, методология ЛВМ нашла свое применение несколько позже и развивалась преимущественно для оценки промышленной безопасности предприятий химического сектора промышленности (риска промышленных аварий). Правительственные органы европейских стран, отвечающие за промышленную безопасность, проявили интерес к использованию методологии ЛВМ при таких разрешительных процедурах, как лицензирование, разрешение на размещение производств. Важнейшее стимулирующее значение для развития методов КОР имело принятие Европейским Советом 24.06.1982 г. Директивы 82/501/ЕЕС "Об опасности серьезных инцидентов на определенных промышленных установках", называемой также "Директивой по Севезо-1", [145], (далее – директива "Севезо-1").

Европейский Совет принял эту директиву с целью предотвращения крупных аварий на предприятиях, в которых обращаются опасные химические вещества. Директива "Севезо-I" еще не требовала от администрации предприятий, расположенных на территории ЕЭС, на которых обращаются опасные вещества, выполнять какие-либо количественные оценки возможных сценариев аварии. Главное ее требование – всесторонний самоанализ достаточности принимаемых администрацией предприятий мер, направленных на предотвращение крупных химических аварий.

Кроме этого, директива обязала предприятия передавать в государственные структуры, отвечающие за промышленную безопасность, важные сведения о состоянии дел по обеспечению безопасности. Предполагалось, что надзорные органы будут осуществлять на подобных предприятиях регулярные проверки, [145]. В части выполнения количественных оценок риска сдерживающим обстоятельством являлось то, что опыт применения ЛВМ в неядерной области ограничивался несколькими европейскими отчетами, например [146], [181].

В процессе выполнения количественных оценок вероятности летальных исходов, вызванных аварийными утечками опасных химических веществ, возникла идея о трехзонном нормировании риска, которую, согласно Верстигу (Versteeg), [241], выдвинул Роув (Rowe) в своей монографии "Анатомия риска" [212]. Эту идею наглядно иллюстрирует "принцип светофора": (красная зона – область неприемлемого риска, зеленая – безусловно приемлемого, желтая зона – область регулируемого риска).

На рисунках 1.2 и 1.3 показаны предложения по нормированию индивидуального и социального рисков, соответственно, согласно "принципу светофора".

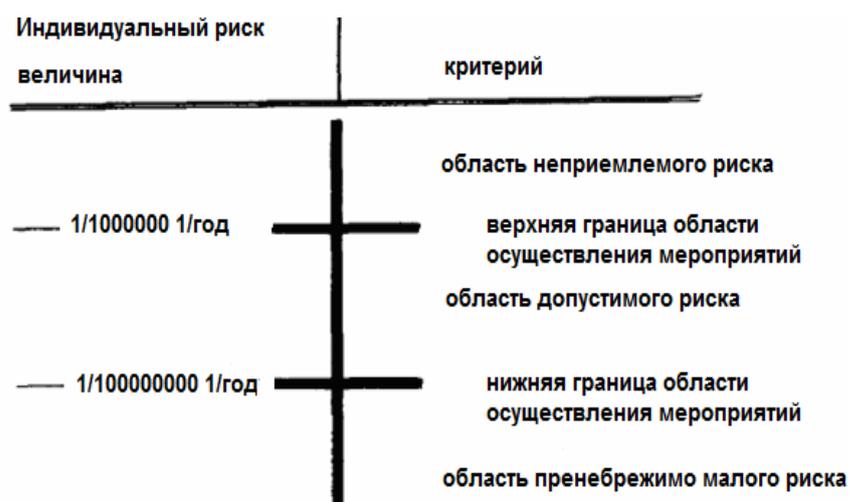


Рисунок 1.2 – Нормирование индивидуального риска, [212]

Предприятиям, для которых оцененный индивидуальный риск попадал в "желтую" область, предписывалось использовать концепцию ALARA (As Low as Reasonable Achievable), предполагающую внедрение "наилучших технологий" (best practices).

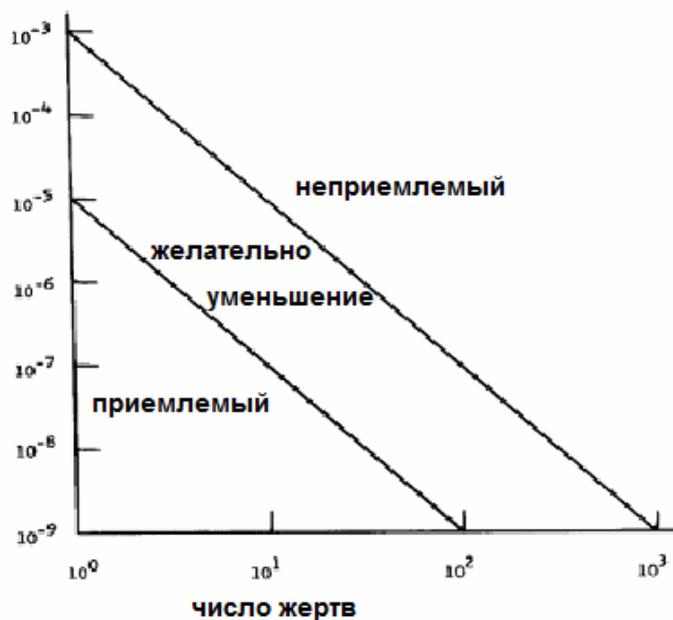


Рисунок 1.3 – Нормирование группового риска, [212]

Важнейший вклад в развитии количественных методов риск-анализа был сделан правительством Нидерландов, которое инвестировало в данное научное направление серьезные финансовые средства. В результате именно серия созданных Нидерландской организации прикладных исследований (TNO) Руководств по ЛВМ, называемых "цветными книгами", оказались лучшими, наиболее детально проработанными документами этого типа, в мире. Первые издания этих Руководств вышли в свет:

- CPR-12E. Методы определения и вычисления вероятности ("красная книга") – в 1988 году;
- CPR-14E. Методы расчета физических эффектов ("желтая книга") – девятью годами ранее, в 1979 году;
- CPR-16E. Методы определения возможного ущерба ("зеленая книга") – в 1992 году;
- CPR-18E. Руководство по количественной оценке риска ("пурпурная книга") – существенно позже, в 1999 году.

Следует отметить, что уже в 80-годах прошлого века европейцы понимали необходимость КОН. В частности, в качестве источников неопределенности перечислялись: допущения о распределении людей на территории, исключение из рассмотрения некоторых сценариев аварии, а также оценка вероятности токсического поражения человека по зависимостям "доза-эффект". Этой проблеме посвящены специальные разделы "красной" и "пурпурной" книг.

В 1985 году в развитие требований Директивы Севезо-1 правительство Нидерландов разработало документ [158], обязавший химические компании своей страны, в которых обращаются опасные вещества в количествах, превышающих пороговые (а таковых оказалось около 70-ти), разрабатывать и представлять каждые пять лет в соответствующие государственные надзорные органы "Внешний отчет о безопасности". Важнейшим элементом данного отчета является раздел по КОР, содержащий четыре части:

- 1) идентификация возможных аварийных событий;
- 2) количественная оценка их последствий (hazard analysis);
- 3) оценка вероятности аварий, сопровождающихся выбросов опасных веществ, а также – вероятности создания летальных концентраций;
- 4) расчет индивидуального и социальных рисков.

Очевидной новацией "Внешнего отчета о безопасности" стали содержащиеся в нем нормативы предельных уровней индивидуального и социального рисков:

- а) индивидуального – для новых установок он не должен был превышать  $10^{-6}$  год<sup>-1</sup>;
- б) социального – предельное значение вероятности гибели не менее чем  $10^n$  человек составляло  $10^{-3-2n}$  год<sup>-1</sup>, [139].

Подобные нормативы риска несколько ранее были разработаны правительством Нидерландов для безопасности дамб, защищающих территорию страны от вод Северного моря – после катастрофического наводнения 1958 года. Здесь уместно напомнить, что отечественный аналог "Внешнего отчета о безопасности" – Декларация промышленной безопасности – стала обязательной для российских опасных производственных объектов (ОПО) лишь 12 лет спустя, после принятия соответствующего Федерального закона [118].

Достаточно содержательной идеей, послужившей лучшему пониманию природы неопределенности результатов техногенного риска и разработке подходов к ее количественному оцениванию, стало выделение двух типов неопределенности – объективной, стохастической (aleatory) и субъективной, познавательной, т.е. обусловленной состоянием знаний о предмете (epistemic). Согласно [134] такое предложение впервые было сформулировано в отчете МАГАТЭ серии "Безопасность" № 100 "Оценка надежности предсказаний, полученных с применением моделей распространения [примесей] в окружающей среде", [183], подготовленном в 1989 году.

Для разработки методов количественной оценки неопределенности идея оказалась достаточно продуктивной. Между тем очень похожее деление неопределенности по своему происхождению на два типа можно видеть уже в первых исследованиях по проблеме неопределенности экологического риска, проводимых под эгидой US EPA. В них было принято выделять:

а) вариабельность, как объективное свойство объектов экосистем и окружающей среды;

б) собственно неопределенность, определяемую текущим состоянием знаний об этих предметах и их взаимосвязях – неполным, неточным, неоднозначным.

Продолжая краткий обзор хронологии событий в сфере изучения неопределенности техногенного риска, нельзя не упомянуть две дискуссии (в 1996 и 2004 годах), которые организовало издательство Elsevier на страницах журнала "Reliability Engineering and System Safety". Проблеме КОН были посвящены два специальных номера этого журнала: № 54 (1996) и № 85 (2004).

Одновременно следует отметить, что в западноевропейской литературе по КОП имеются авторитетные Руководства, в которых тема КОН проигнорирована. Такова, например, фундаментальная трехтомная монография Lee's Loss Prevention... [193 – 195] совокупным объемом 3705 страниц, в которой для данной проблемы не нашлось места.

Что касается исследований по интересующему нас вопросу в России, приходится констатировать, что по теме КОН пожарного (аварийного) риска опубликованных работ очень мало. Подавляющая часть имеющихся публикаций на русском языке посвящена соотношению "риск – неопределенность" в экономической области: инвестиционном и страховом деле, банковском бизнесе и т.п. Это резко контрастирует с сотнями (если не тысячами) опубликованных работ по данной теме на английском. Последнее время в отечественной литературе стали чаще появляться работы по КОН в инженерном деле, например [9], [10], [35], [37].

Анализ отечественных нормативных документов по промышленной и пожарной безопасности свидетельствует:

а) отечественные нормативно-методические документы по пожарной безопасности, в том числе – основное действующее Руководство (Методика) по КОП [61], также оперируют исключительно точечными значениями всех параметров. Вопрос о неопределенности каких-либо величин в них никогда даже не ставился, что является, вообще говоря, с современной точки зрения серьезным методологическим изъяном;

б) Руководство по безопасности "Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах" [93], утвержденное Ростехнадзором, содержит п.50, регламентирующий структуру отчета о КОП. Следует отметить содержащуюся в нем рекомендацию наличия раздела "Анализ неопределенностей результатов оценки риска аварий". Для целей такого анализа [93] требует представления в отчете:

- описания используемых методов анализа, моделей аварийных процессов и обоснования их применения, принятых предположений и ограничений;
- исходных данные и их источников;
- перечня используемых источников информации.

При этом, к сожалению, каких-либо практических рекомендаций по выполнению КОН данное Руководство не содержит;

в) ГОСТ Р 51901.1-2002 [26], имеет раздел 4.4.4. "Неопределенности". В нем на половине страницы текста кратко повествуется об источниках неопределенности результатов АТР и о том, что эту неопределенность необходимо количественно оценивать;

г) ГОСТ Р 51901.5-2005 [28] затрагивает лишь вопросы оценки параметрической неопределенности;

г) ГОСТ Р 51901.13-2005 [27] в отношении анализа неопределенности результатов ФТА существенно уступает Руководству [224], подготовленному U.S. NRC еще в 1981.

Обратимся к некоторым известным монографиям отечественных специалистов по проблеме оценки техногенного риска. Монографии [15], [34] посвящены преимущественно вопросам hazard analysis, в них используются точечные оценки, аспект неопределенности полученных результатов не рассматривается, то же касается и монографий [39], [98].

В книге [1] концепция риска раскрыта более полно, однако и в ней вопросу КОН внимание не уделено. Из всего, что удалось прочесть на русском языке, можно назвать лишь книги [38], [69], в которых проблема неопределенности отчасти освещена. Так, в монографии О.М.Ковалевича [38] имеется раздел 4.4 "Неопределенность результатов вероятностного анализа безопасности", в котором автор дает краткое описание проблемы и методов ее решения. К сожалению, в нем смешаны понятия параметрической и модельной неопределенности (оба типа трактуются как неопределенность входных параметров).

В качестве способа КОН предложено статистическое моделирование – классический выборочный метод Монте Карло и его модификация – метод Латинского суперкуба (LHS, Latin Hypercube Sampling). Аналогичным образом эта проблема освещена в монографиях [2], [5].

В четвертой главе [69] авторы отмечают, что при проведении вероятностного анализа безопасности ядерного реактора целесообразно ограничиться анализом уровней 1 и 2 (согласно классификации МАГАТЭ, совпадающей с подходом U.S. NRC), поскольку неопределенность оценок уровня 3 чрезмерно высока.

Приведенный здесь краткий обзор опубликованных работ на русском языке, по-видимому, не полон. В качестве положительного факта следует отметить, что в послед-

ние годы тематике оценки и анализа неопределенности неоднократно посвящались специальные выпуски одного из ведущих отечественных научных журналов по риск-методологии "Проблемы анализа риска". Однако в целом следует признать серьезное отставание отечественной теории анализа и количественной оценки аварийного риска от международного уровня.

### 1.3 Постановка проблемы КОН: исторический аспект

Как уже было отмечено выше, одной из заслуг методологии анализа риска перед наукой следует признать постановку проблемы количественной оценки неопределенности результатов, полученных в ходе теоретического исследования. Неопределенность в своем качественном аспекте, являясь антитезой знания, характеризует степень нашей осведомленности об области, находящейся за "линией фронта" переднего края науки. Это та *terra incognita*, которая завоевывается усилиями исследователей, отступая под их натиском. Именно этому аспекту неопределенности посвятил свою монографию [197] Д.Линдли.

Следует подчеркнуть, что, в отличие от трактовок соотношения "неопределенность-риск" представителями гуманитарного знания, описанных нами в предыдущем разделе, в области анализа техногенного риска практически с самых первых работ стремились к количественному выражению неопределенности получаемых результатов. Таким образом, неопределенность в АТР выступает в качестве меры разброса (рассеивания) результата, т.е. как в современной метрологии.

Подчеркнем один важный методологический аспект – какие бы математические формы ни были предложены для представления риска, например, триплет, [190], вектор [113], матрица или специальный параметр типа RPN, на завершающей стадии КОП следует выполнить их "свертку" в число. Иначе говоря, должен быть предложен некий "синтетический" численный параметр (названный, например, *метрикой риска*), который позволил бы в последующем сравнивать и ранжировать альтернативные варианты управления риском, [40]. Это связано с тем, что сравнивать между собой можно только числа одинаковой размерности. А методология анализа риска – это именно *сравнительная* методология (ибо количественные оценки в ней получаются в некоторых условных координатах. Это касается обоих компонентов риска, характеризующих:

- вероятность события;

- величину причиняемого ущерба.

Наиболее полезным применением риск-ориентированного подхода является подготовка обосновывающей информации для принятия решений путем выбора наиболее оптимальной из веера альтернатив. Между тем корректное обоснование такого выбора без учета величины неопределенности полученных результатов невозможно. Если этого не сделать, возникнет ряд негативных моментов, на которые еще в 1990 году обратил внимание в своей монографии [161] А. Финкель (Finkel). Он указал на четыре "подводных камня", угрожающих утратой доверия к полученным в процессе оценки техногенного риска результатам, как со стороны общественности, так и лиц, принимающих решения (ЛПР) – если в отчете *не будет* приведена оценка неопределенности:

"1) в этом случае у ЛПР не будет возможности верно оценить, как вероятность, так и последствия негативных эффектов, связанных с выбросом опасных веществ, поэтому возрастает вероятность принятия ошибочных управленческих решений;

2) сообщение лишь точечных оценок не позволяет ЛПР правильно взвешивать альтернативы и сужает диапазон маневра для эффективного менеджмента;

3) точечные оценки без указания на неопределенность результатов подрывают доверие между вовлеченными сторонами (экспертом, Заказчиком, ЛПР, общественностью), поскольку демонстрирует переоценку экспертной стороной точности полученных результатов;

4) наконец, такое положение дел не стимулирует новые научные исследования, направленные на получение нового знания и уменьшения неопределенности" [161], (цит. по [238]).

С подобными выводами трудно не согласиться. На важность и необходимость количественной оценки неопределенности при выполнении анализа риска указывают авторы статей [170], [207] специального выпуска журнала "Reliability Engineering and System Safety" № 54, вышедшего в 1996 году. А также – авторы второго специального выпуска этого журнала, № 85 (2004 год), [135], [169], [205].

Как уже было отмечено выше, несколько условно все исследования по проблеме техногенного риска (риска, сопряженного с функционированием технических систем) можно разбить на две большие области:

- 1) область экологического риска;
- 2) область пожарного и аварийного рисков.

На сегодняшний день исследования техногенного риска выполняются преимущественно в рамках ЛВМ (его англоязычный аналог PRA – Probabilistic Risk Assessment). Эта методология заключается в использовании сценарного подхода к описанию возможного поведения объекта в исследуемых обстоятельствах. Каждый сценарий пошагово моделируется во времени с учетом возможных причинно-следственных связей между элементами объекта, объектом и окружающей средой. На последующем этапе с учетом вероятностей "срабатывания" каждого элемента и логических связей между ними выполняются количественные оценки вероятности реализации каждого сценария в целом.

Анализ постановки задачи количественной оценки неопределенности начнем с экологического риска. В этом отношении интересно проследить эволюцию взглядов US NRC. Так, в отчете Совета [237] 1983 года о неопределенности результатов сказано исключительно в проблемном, постановочном ключе – "такая проблема существует, ее необходимо решать". Более того, уже в 1983 было констатировано, что проблема КОН является ключевой для риск-методологии. Авторы отчета после анализа состояния дел в сфере исследований экологического риска сформулировали 10 рекомендаций. Один из главных выводов заключался в необходимости разделения задач оценки и управления риском, поскольку первая является задачей аналитической, требующей научных подходов и соответствующей квалификации, в то время как вторая – задача управленческая, которая должна быть передана на административный уровень.

Авторы отчета неоднократно указывали на необходимость разработки Руководства по методологии риск-анализа, которое, с одной стороны, было бы построено на универсальных принципах, с другой – позволяло бы дифференцированно учесть особенности каждой конкретной задачи.

Касаясь проблемы неопределенности, рекомендация № 7 отмечает, что в будущем Руководстве следует оценить возможности науки в части прогноза последствий для здоровья людей от воздействия вредных веществ, очертить границы зоны неопределенности, определить возможные способы обращения с этой неопределенностью.

Согласно рекомендации № 8 количественные оценки предпочтительнее начать с канцерогенных эффектов, вызванных опасными веществами, как наиболее исследованных. Здесь легче очертить границы области достоверного (hard) научного знания, идентифицировать неопределенности, разработать методы обращения с ними, которые могут стать важным первым шагом в решении проблемы КОН.

Десять лет спустя, в 1994 году, US NRC выпустил отчет [239], в котором имеются отдельные главы 9 и 10, целиком посвященные различным аспектам оценки неопределенности. Удивительно, что в начале 90-х годов прошлого века в США не для всех персон, входящих в круг ЛПР (decision-maker) верхнего эшелона, необходимость этого шага была очевидной. Например, тогдашнее руководство US EPA отвергало саму идею анализа и оценки неопределенности. Это иллюстрирует содержание первого тома Руководства для Суперфонда [235] и Руководства [234]. Однако через двенадцать лет, в 2001 году, мнение Агентства радикально поменялось, что отчетливо демонстрирует содержание третьего тома Руководства для Суперфонда, [236].

В 1994 году US NRC констатировал, что из-за отсутствия подходящих Руководств в US EPA при оценке риска для здоровья преобладает качественный подход к оценке неопределенности, не учитывается дополнительная неопределенность, возникающая из-за эффекта синергизма. Так, например, при оценке асбеста как агента, способного вызывать рак языка, нередко игнорируется такой значимый фактор, как курение.

Еще один отчет по этой же проблеме, [238], US NRC подготовил в 2009 году. Члены Совета вынуждены констатировать, что проблема КОН спустя 26 лет с момента подготовки первого отчета (1983 г.) и 15 лет – отчета 1994 года, по-прежнему является наиболее сложнейшей во всей методологии анализа экологического риска. "Она оказалась настоящим крепким орешком", – так сказано в отчете.

В отчете [238] отмечается, что задача полноценной КОН результатов оценки техногенного риска, по крайней мере, в области экологического риска, по сути, остается нерешенной, несмотря на обилие разработанных Руководств по частным ее аспектам. Универсального Руководства, построенного на ясных, четко установленных принципах, в котором содержались бы указания на необходимую степень детализации для каждого конкретного случая – в зависимости от особенности задачи – нет до сих пор. Авторы отчета [238] призывают во всех случаях по возможности вместо фактора неопределенности использовать полноценное вероятностное описание неопределенности – в виде функции плотности вероятности, или функции накопленной вероятности.

Отметим, что рекомендации по необходимой степени детализации при проведении КОН техногенного риска несколько различаются. Так, в своей часто цитируемой статье [208] Патэ-Корнелль (Pate'-Cornell) предложила шесть уровней такой детализации, US EPA – в своем Руководстве для Суперфонда [236] – три, а ИПС в своем отчете [155] – четыре уровня.

Последний из упомянутых отчетов заслуживает особого внимания. Он выполнен в 2006 году рабочей группой в рамках международной программы безопасности химической промышленности (IPCS) и целиком посвящен анализу проблемы КОН экологического риска. Представляют интерес рекомендации, даваемые его авторами:

1) оценка неопределенности (будь-то качественная, либо – количественная), должна быть обязательной составной частью любого этапа процедуры оценки риска;

2) необходимо стремиться к систематической идентификации любых источников неопределенности на строго научной основе;

3) все используемые в процессе работы допущения, упрощения, а также привлекаемые экспертные суждения должны быть в обязательном порядке документированы;

4) при получении любой новой информации все выполненные оценки следует повторить с ее учетом;

5) важно позаботиться о способе информирования общественности о полученных результатах КОР и КОН, учитывая особенности целевой аудитории.

Несколько иной подход к определению требуемого уровня КОН предлагают авторы коллективной монографии [222]. Количественной оценкой неопределенности уровня-1 они называют модель, описывающую структуру неопределенности, если параметры этой модели заданы точечными значениями. Модель может быть детерминистической (интервальной), вероятностной (в виде функции плотности вероятности или накопленной вероятности), или комбинированной – построенной в рамках теории свидетельств Демпстера-Шафера.

Очевидно, что параметры этой модели также обладают некоторой эпистемической неопределенностью. Согласно [222] КОН уровня-2 предполагает учет неопределенности самих этих параметров. Однако совершенно очевидно, что, согласно данной логике, уровень-2 также не является окончательным, еще более информативным является уровень-3 и т.д., [48].

Что касается исследований риска аварий, вплоть до 1970-х годов здесь преобладали детерминистические подходы, опасность техногенных аварий было принято оценивать точечными значениями, полученными в консервативной постановке, т.е. при наиболее худшем варианте развития событий. Вехой в развитии логико-вероятностных методов в исследовании техногенной безопасности стал отчет "WASH-1400".

Рассматривая требования американских нормативных документов по ядерной безопасности, можно отметить, что краткие упоминания об анализе неопределенности параметров модели есть уже в NUREG-0492 [224].

В качестве ремарки укажем на важное положение, содержащееся в отчете МАГАТЭ 1989 года [183], которое гласит – в особом случае доказанной сильной зависимости между параметрами модели КОН может не выполняться.

За прошедшие более чем два десятилетия усилиями специалистов U.S. NRC, SANDIA National Laboratories, EPRI и других исследовательских центров США достигнут определенный прогресс в развитии методологии. Новые документы, посвященные проблеме КОН рисков ядерной отрасли США [137], [221], [225], на наш взгляд, являются одними из лучших на сегодняшний день разработок по проблеме КОН риска аварий, выполняемой в вероятностной постановке. Однако, к сожалению, сфера их применения узка – это объекты и технологии ядерного цикла – т.е. та сфера, где оправдано применение вероятностного подхода.

Что касается Европы, то, по общему мнению, лучшими (наиболее полными и детальными) Руководствами по анализу риска промышленных аварий из разработанных европейцами, являются четыре "цветные" книги, подготовленные нидерландской TNO. Отметим, что постановка проблемы неопределенности оценок присутствовала уже в первом издании CPR-12E, [147], посвященном методам оценки вероятности нежелательных событий (связанных с выбросом/сбросом опасных веществ). Эти вопросы подробно исследуются в специальной главе 15 этого документа.

Методы расчета физических эффектов, сопровождающих аварии с участием опасных веществ, изложены в "желтой" книге, CPR-14E [148]. Эта задача рассмотрена в традиционной детерминистической постановке (hazard analysis), без какого-либо внимания к оценке неопределенности (ни качественной, ни количественной). О неопределенности параметров модели (в качественном смысле) там имеются лишь два упоминания.

Методы оценки ущербов, на наш взгляд, на сегодняшний день – наименее разработанный аспект проблемы КОП. Не удивительно, что неопределенность (в т.ч. ее субъективный компонент) оценок ущерба от аварий очень велика. "Зеленая" книга, CPR-16E [149], говоря об оценке ущерба для здоровья людей от воздействия высоких концентраций опасных веществ, вследствие аварии в натуральном выражении, предлагает использовать UF, составляющий от 10 до 100. Это соответствует подходам, развитым в аналогичных исследованиях US EPA.

Завершающая серию Руководство, "пурпурная" книга, CPR-18E [150] (второе издание, 2005 года), подходит к рассмотрению проблемы КОН результатов более современно, комплексно. Последняя ее глава называется "Неопределенность КОР". В этой главе, наряду с постановкой задачи, перечисляются возможные источники неопределенности.

Неопределенность пожарного риска и техногенного риска в целом некоторое время занимало умы исследователей из Университета г.Лунд (Швеция). На эту тему в Университете написано несколько отчетов и диссертаций (PhD). В своей докторской диссертации (PhD) [163] Х.Франциш (Frantzich) отмечает, что стандартная процедура КОР (QRA) пожарного риска не предполагает оценку неопределенности. Между тем, многие модели, используемые для описания развития пожара, включают в себя большую внутреннюю неопределенность. В этой связи, по его мнению, необходимо выполнять "расширенную КОР".

Эта тема получила развитие в последующих публикациях Университета [133], [134], [198]. Так, по мнению М. Абрахамссона (Abrahamsson), изложенному им в отчете [134], проблема КОН техногенного риска в основных действующих на начало нового столетия международных и национальных стандартах и Руководствах решена неудовлетворительно, только в постановочном плане. Какие-либо удовлетворительные практические рекомендации по выполнению КОН отсутствуют.

С точки зрения постановки проблемы представляет интерес классификация целей, для которых, собственно, выполняется КОН. Всего, по мнению авторов [242], существует четыре типа таких целей:

- *"понимание"* (понять влияние и ранжировать источники неопределенности по их важности и вкладу в общий "бюджет неопределенности" – для более эффективного планирования дальнейших исследований);
- *"аккредитация"* (проверить, верифицировать модели системы, методы измерений, работу технических устройств – с целью оценки их адекватности);
- *"выбор"* (проанализировать структуру управления системой с целью ее оптимизации);
- *"анализ соответствия"* (продемонстрировать соответствие системы внешним требованиям, например, при лицензировании).

#### **1.4 Подходы к описанию источников неопределенности техногенного риска**

Теме классификации источников неопределенности результатов КОР посвящено большое число опубликованных работ на английском языке. При этом, как показывает

анализ, различные варианты такой классификации в общих чертах совпадают. Что касается природы неопределенности, следует указать на два ее принципиально различных типа, которые, хотя в различных "школах" (или подходах) и обозначаются различными терминами, означают по сути одно и то же:

- первый из них связан с объективной изменчивостью (вариабельностью) свойств изучаемой системы, являющейся частью Природы (под системой здесь следует понимать всю совокупность объектов, участвующих в реализации изучаемых негативных процессов – собственно технический объект, метеорологические условия и свойства подстилающей поверхности, расположение на местности объектов-мишеней (объектов поражения) – людей, флоры и фауны, свойства людской популяции (например, ее половозрастная структура и т.д.);
- второй обусловлен субъективным фактором – недостаточностью (неполнотой, неточностью, неоднозначностью) имеющихся знаний о свойствах изучаемой системы, не позволяющей точно описать и спрогнозировать негативные эффекты, возникающие в ней под воздействием исследуемого технического объекта (либо техносферы в целом).

Тип неопределенности, перечисленный первым, в одном из подходов принято называть стохастической неопределенностью (в альтернативном подходе, развиваемом US EPA, а также US NRC, этот тип традиционно обозначается термином *вариабельность, изменчивость*).

Второй тип, связанный с состоянием знания, в первом подходе сначала был назван эпистимологической (*epistemological*), т.е. связанной с процессом познания неопределенностью, [183], а во втором – просто *неопределенностью*. Примечание [из жизни слов]: *epistemological* постепенно сократилось до *epistemic* (*эпистемической*).

Отчет МАГАТЭ подчеркивает принципиальное различие двух типов неопределенности – если стохастическая неопределенность (тип А) создается вариабельностью, то эпистемическая (тип В) – альтернативностью, [49]. Методология отчета МАГАТЭ, по видимому, основана на идеях относительно выражения неопределенности измерений, возникших в международной метрологии к началу 80-х годов прошлого века. Сначала эти идеи были оформлены в виде Рекомендации INC-1 [188], а затем, в окончательном виде – в первой версии [171] Руководства по выражению неопределенности измерений GUM [186] (имеется русский перевод, [96]). Подробнее все сказанное изложено в нашей статье [52].

Между тем, по мнению Хофера (Hofer), [178], на самом деле различия между этими двумя типами неопределенности несколько размыты, поскольку физические трактовки явлений часто основаны на некоторых предположениях и моделях, имеющих элемент

эпистемической неопределенности. В этой связи одни и те же данные можно трактовать с позиций как стохастической, так и эпистемической неопределенности. Аналогичную мысль высказывают авторы норвежского исследования об этическом выборе в науке [211]: границу между типами А и В неопределенности не всегда можно четко провести.

Представляет интерес графическая интерпретация (рисунок 1.4) четырех случаев, характеризующихся различным соотношением между неопределенностями типа А (стохастической) и типа В (эпистемической), [183]. Оба типа неопределенности предложено аппроксимировать функцией накопленной вероятности: для типа А –  $q(Y > y)$ , типа В –  $q(Y \leq y)$ .

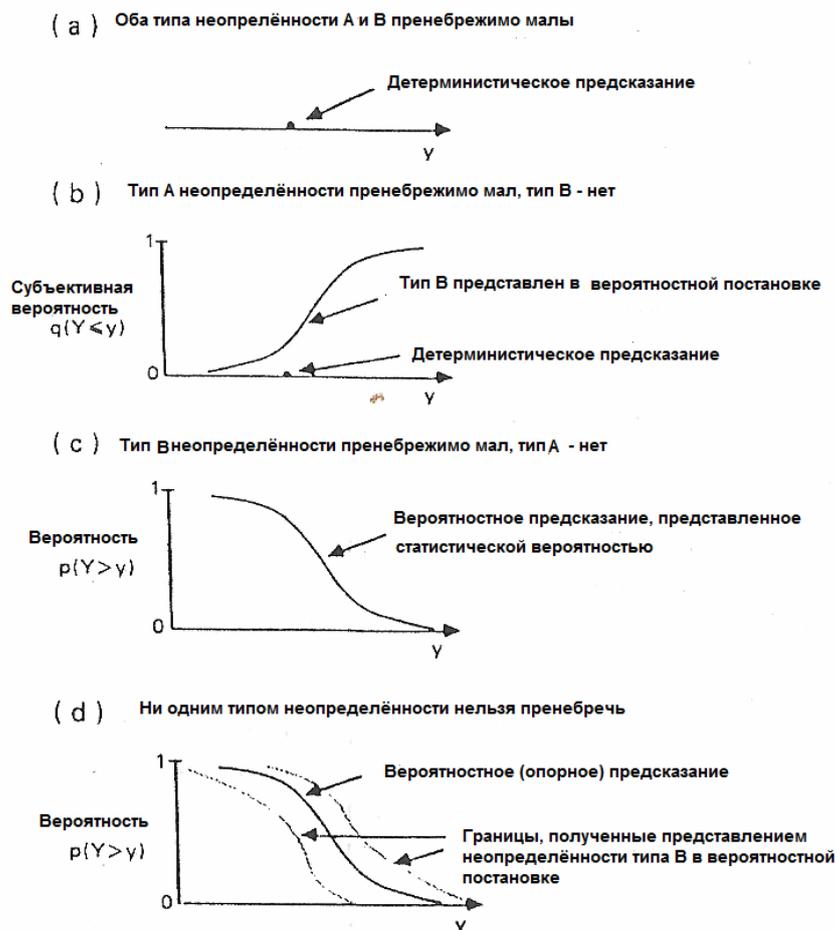


Рисунок 1.4 – Форматы представления результатов моделирования в зависимости от типа неопределенности: типом А или В, [183]

Можно отметить, что на рисунке 1.4 (d) изображен уровень-2 неопределенности согласно определению авторов [242].

Следует упомянуть еще один вид неопределенности, появляющийся в процессе оценивания техногенного риска. Это неопределенность коммуникативного типа, возникающая при обмене любой информацией о риске – будь-то на этапе КОР, будь-то на этапе изложения полученных результатов общественности или ЛПР.

На этот аспект неопределенности указывают, в частности, авторы отчета ИПС [155]. Как известно, люди воспринимают любую информацию в соответствии со своими пред-

ставлениями и установками. В процессе передачи информации о результатах КОР (точнее, его смысла) от риск-эксперта другим людям – ЛПР, или общественности, возникает проблема неоднозначного понимания, толкования сообщения.

В основном она обусловлена эффектом неоднозначности, двусмысленности используемых понятий, для которого в английском языке используется термин *ambiguity*. Нередко именно различное толкование разными людьми одного и того же понятия, обозначающего объект или его свойство, приводит к различным выводам, делаемым на основании одних и тех же количественных значений. Следует подчеркнуть, что *ambiguity* относится к категории устранимых источников неопределенности, поскольку всегда существует возможность уточнить трактовку терминов, сделав ее более полной и однозначной – либо с помощью соглашений (например, решением симпозиума, конгресса и т.п.), либо – нормативного документа.

Для того чтобы быть правильно понятым, т.е. уменьшить неопределенность восприятия, всегда следует начинать с толкования используемых терминов и понятий. Этот тип неопределенности часто называют также *терминологическим*.

Подходы к классификации источников неопределенности при выполнении КОР в научной литературе несколько различаются. К числу одной из первых европейских публикаций по этой проблеме можно отнести "красную" книгу, CPR-12E [147], впервые вышедшую в 1988 году. Внимательное изучение главы "Анализ неопределенности, важности и чувствительности" показывает, что проблема КОИ в ней рассмотрена лишь отчасти:

- во-первых, CPR-12E посвящена методам количественного оценивания только одного компонента риска – вероятности событий аварийного процесса;
- во-вторых, рассмотрен только аспект параметрической неопределенности аварийного риска.

Значительно обстоятельнее проблема происхождения неопределенности аварийного риска рассмотрена в более позднем Руководстве CPR-18E [150], которое выделяет три группы источников неопределенности результатов КОР:

- постановку задачи (*starting point*);
- используемую модель, т.е. модельную неопределенность;
- значения входных параметров модели, параметрическую неопределенность.

Под постановкой задачи CPR-18E понимает выбор одного из двух альтернативный подходов к оценке риска промышленных аварий:

- консервативного (рассматривающего сочетание наиболее опасных условий возмож-

ной аварии);

- реалистичного (учитывающего конкретные обстоятельства аварии).

Очевидно, что в рамках консервативного подхода неопределенность оценки риска получается существенно меньшей, поскольку уменьшена ее объективная (стохастическая, aleatory) составляющая. Эта составляющая обязана изменчивости различных аспектов аварийной ситуации (например, количества опасного вещества, участвующего в аварии, метеоусловий, количества людей в области поражения и т.д.). Можно напомнить, что на ранних этапах развития методологии АТР (как в области экологического, так и риска аварий), преобладал именно консервативный подход. Как правило, получаемые в его рамках оценки оказывались чрезмерно драматичными, что требовало неоправданно больших затрат на реализацию превентивных мер.

Вариант несколько более полной классификации содержится в отчете [183], в нем отмечается, что неопределенность может быть обусловлена:

- 1) идентификацией проблемы и/или сценария;
- 2) избранной концептуальной моделью;
- 3) используемой расчетной (компьютерной) моделью;
- 4) величиной параметров модели;
- 5) ошибками в документировании процесса КОР.

Учитывая, что особенностью ЛВМ, как методологической основы анализа техногенного риска, является сценарный подход, первый член приведенной классификации особо важен. Неопределенность, обусловленную выбором сценария (ев) возможного развития аварийного процесса, назовем *сценарной* неопределенностью.

Последние два ее члена связаны с человеческим фактором. Многие авторы полагают, что ему принадлежит один из ведущих вкладов в общий бюджет неопределенности, это отмечалось еще в отчете WASH-1400. Причем человеческий фактор чрезвычайно многообразен:

а) во-первых, человек может выступать в качестве источника экспертных суждений, на основании которых при проведении КОР оцениваемой величине приписывают численные значения. Высказываемое человеком мнение определяется множеством обстоятельств (явных и скрытых) субъективного и интерсубъективного свойства: полученным образованием, имеющимся опытом, материальным интересом, тонкими психологическими соображениями и т.д. Известно, что хотя практика использования экспертных суждений в США берет начало еще в 40-х годах прошлого века, при выполнении КОР они

впервые были широко использованы в отчете WASH-1400. Как отмечает А.Данешха (Daneshkhan) в своем обзоре, посвященном проблеме неопределенности в ЛВМ [153], необходимость в привлечении экспертных суждений возникает в следующих случаях:

- информация отсутствует, либо скудна;
- требуемые данные очень дороги, либо их крайне сложно найти;
- данные допускают неоднозначную интерпретацию, нестабильны или ненадежны;
- на этапе предварительных оценок.

Хотя к настоящему времени и разработаны методы предварительной "калибровки" экспертов, на практике чаще всего приходится испрашивать мнение эксперта как раз за пределами области его "калибровки", а это – еще один источник неопределенности. Кроме того, очевидный методологический изъян метода экспертного оценивания связан с тем, что обычно человек не способен критично оценить неопределенность собственных суждений, [153]. Отметим, что методам экспертного оценивания посвящена обширная литература;

б) во-вторых, человеку, как известно, свойственно совершать ошибки (по невнимательности, незнанию, из-за дефицита времени, наконец – осознанно). Существует разработанная классификация видов человеческих ошибок: по типу, происхождению и т.д. Одной из широко распространенных разновидностей человеческих ошибок являются ошибки в расчетах – общеизвестным является факт, что расчеты, выполненные разными экспертными командами с помощью одной и той же компьютерной программы и с одинаковыми исходными данными, часто дают различные результаты;

в) в-третьих, корни скрытой неопределенности находятся в области знаний риск-эксперта, недоступных для логического анализа. Этот тип неопределенности ярко проявляется, например, при построении деревьев отказов. В литературе отмечается, что деревья отказов, построенные для одной и той же относительно сложной технической системы разными экспертами (или экспертными командами) практически всегда различались, хотя с точки зрения формальной логики все дендрограммы оказывались безупречными. А поскольку дендрограммы получались разными, то и выполненные по ним расчеты, даже с использованием одинаковой базы данных о параметрах отказов элементов, давали различающиеся результаты.

Касаясь проблемы эпистемической неопределенности, авторы отчета [211] предлагают различать случаи:

- а) *частичного знания* (когда мы знаем то, что мы не знаем). В этом случае неопреде-

ленность, хотя бы качественно, может быть оценена;

и

б) *полного незнания* (когда мы не даже не догадываемся о том, что не знаем). Очевидно, что в ситуации б) эпистемическая неопределенность является принципиально не только не оцениваемой, но и неустранимой. В [155] для этого типа неопределенности предложен специальный термин *indeterminacy* (*неопределимость*).

Происхождение неопределенности результатов расчетов (прогнозов) с использованием математической модели может быть проиллюстрировано рисунком 1.5, заимствованном нами из [183].

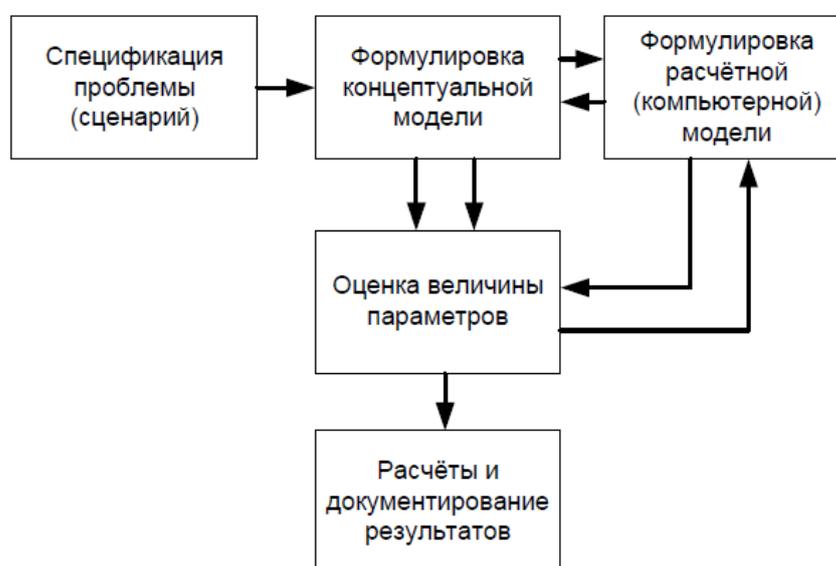


Рисунок 1.5 – Пять классов эффектов, влияющих на надежность предсказаний модели, [183]

В качестве важного шага в разработке методов управления техногенного риска следует рассматривать предложение U.S. NRC [225] выделять среди всех источников неопределенности *ключевые*, к каковым рекомендовано относить лишь те, которые способны оказать влияние на величину результата. В качестве результата [225] рассматривает метрику риска – критерий, который подлежит сравнению с допустимым значением, и, следовательно, может повлиять на принятие важных решений.

Однако для ранжирования источников неопределенности необходимо обладание методом ее количественной оценки.

## 1.5 Краткое описание основных типов неопределенности

### 1.5.1 Модельная неопределенность

Неопределенность, обусловленная используемыми при КОР физико-математическими моделями, относится ко второму типу (субъективной, или эпистемической неопределенности). Модельная неопределенность (МоН), хотя и может быть уменьшена по величине, тем не менее, принципиально неустранима, т.е. не может быть сведена к нулю. Этот факт обусловлен тем, что теоретико-мыслительная мыслительная деятельность человека связана с моделированием реальности. При этом, как известно, всякая модель:

- а) упрощает реальный объект;
- б) не учитывает (явно или неявно, осознанно или нет) некоторые влияющие факторы;
- в) имеет ограниченную область применимости, [43].

В этой связи уместно сослаться на новеллу третьего издания Международного словаря по метрологии (VIM), [185], которая вводит понятие принципиально неустранимой "внутренней неопределенности", [52]. Внутренняя неопределенность (definitional uncertainty, [185], или intrinsic uncertainty, [186]), суть атрибут научного метода, который вместо реальных объектов оперирует их упрощенными образами, моделями. Она связана именно с ограниченным учетом деталей в самом определении модели объекта (измеряемого, либо моделируемого расчетами). Внутренняя неопределенность есть та минимальная неопределенность, предел, который может быть достигнут при измерениях, или расчетах.

Используемые при количественной оценке риска модели могут быть в большей или меньшей степени полны и адекватны, поэтому как неполнота, так и неадекватность модели – это источники МоН.

Полноту модели характеризует учтенное в ней количество факторов, способных оказывать влияние на поведение моделируемого объекта. В зависимости от того, насколько существенно игнорируемые моделью факторы влияют на поведение последнего, результат моделирования будет в большей или меньшей степени отличаться от поведения объекта. Кроме того, если учесть, что на реальные объекты всегда оказывают влияние внешние (часто и внутренние) факторы случайной природы, становится понятно, что итоги моделирования с неизбежностью будут обладать неопределенностью, [49].

Адекватность модели – понятие более концептуального порядка. Для моделей, используемых при оценке аварийного риска, оно связано с тем, насколько правильно отражена в них физическая сущность моделируемых объектов и явлений. Согласно современным

представлениям, адекватность и полнота модели проверяются в процессе ее *верификации*. В то же время с точки зрения практического использования важнее результаты ее *валидации*, которая заключается в сравнении результатов модельных расчетов с экспериментальными данными.

Область применимости модели также важна, т.к. любая модель построена на некоторых основных принципах, закономерностях, допущениях, справедливых (по крайней мере, верифицированных) в ограниченной области значений своих параметров. Может случиться, что эти закономерности сохранят свою силу и вне границ области применимости, но это уже не может быть гарантировано. Следовательно, источником МоН может быть использование модели за рамками области ее применимости, [49].

Разновидностью модельной неопределенности в КОР является *сценарная* неопределенность, которая проявляется в выборе сценариев протекания аварии, которые эксперт учитывает при выполнении КОР. Ошибки могут быть связаны либо с игнорированием важных сценариев (и, тем самым, недооценке риска), либо, наоборот, учете сценариев, которые на самом деле в рассматриваемых обстоятельствах не могут быть реализованы. В последнем случае результат КОР окажется слишком драматичным, а показатели риска – переоцененными.

Классификация предпосылок возникновения модельной неопределенности, практически идентичная вышеописанной, предложена в CPR-18E. Соответствующая глава "пурпурной" книги гласит, что она может возникать вследствие:

- а) неучета (игнорирования) в модели некоторых факторов (неполнота);
- б) использование модели вне границ области ее применимости;
- г) принятых в модели упрощений (например, линеаризации зависимостей);
- д) игнорирования того факта, что некоторые модельные параметры могут меняться;
- е) ошибок, связанных с расчетами.

Последний пункт требует пояснений. В современных условиях любая модель реализуется в виде системы математических уравнений. В крайне редких случаях эти уравнения допускают точное аналитическое решение, значительно чаще используется их приближенное решение численными методами средствами вычислительной техники. Однако этот способ неизбежно сопровождается дополнительной неопределенностью, обусловленной такими обстоятельствами, как конечное число итераций, величина шага расчета, способ округления и пр. Этот особый тип неопределенности назовем *вычислительным*, [49].

Американский стандарт ASME/ANS RA-Sa-2009 [137] указывает, что источник МоН обнаруживает себя в ситуации, когда среди экспертного сообщества отсутствует едино-

душие по поводу способа аппроксимации того или иного явления. Это типичный случай эпистемической неопределенности – та самая ситуация альтернативности, о которой говорилось еще в отчете МАГАТЭ 1989 года.

Интересная классификация источников МоН предложена ван Ассельтом в [240].

Таблица 1.2 – *Источники модельной неопределенности, [240]*

Неточность	Неопределенность входных данных	Модельная неопределенность
Противоречивые данные	Параметрическая неопределенность	(техническая неопределенность)
Нехватка экспериментальных данных	Неопределенность уравнений	Неопределенность типа модели
Ненадежность	Неопределенность структуры модели	(методологическая неопределенность)
Незнание	Неопределенный уровень доверия	Неопределенность полноты модели
Неопределяемость	Неопределенность о пригодности модели	(эпистемическая неопределенность)

### 1.5.2 Параметрическая неопределенность

Всякая модель, реализованная в виде системы математических уравнений, с неизбежностью включает набор количественных параметров, характеризующих различные свойства моделируемого объекта и окружающей его среды. Значения этих "входных" параметров модели, как по объективным, так и субъективным причинам, обладают неопределенностью, [49].

Объективный фактор (aleatory, стохастическая неопределенность) в данном случае связан с изменчивостью свойств моделируемого объекта (либо – со временем, либо – с учетом индивидуальных различий объектов однотипной серии). Эта вариабельность объективна, носит случайный характер, количественно она может быть задана интервалом между нижней и верхней границами величины параметра. Подобная неопределенность, кстати, проявляется и в эффекте реакции человека на действие поражающих факторов аварии. Люди разные, их чувствительность, например, к токсичным продуктам горения, тепловому излучению и т.д. различается, и очень существенно. Эти различия также следует учитывать в процессе КОН аварийного риска.

Субъективный (эпистемический) фактор параметрической неопределенности (ПаН) заключается в недостатке или неточности информации, используемой экспертом при присвоении параметру модели численного значения.

В наиболее общем случае значения параметров, используемых в модели, могут быть приняты:

- по результатам собственных экспериментов;
- чужим экспериментальным данным;
- литературным, в частности – справочным, данным;
- результатам обработки экспертных суждений, [49].

Качество такой информации оказывается различным: как по наличию в ней ошибок (отклонений принятых значений параметров от действительных), так и по величине рассеивания значений, что непосредственно сказывается на величине неопределенности полученных результатов, [52].

Важнейшими параметрами для оценки вероятности, например, являются данные о параметрах отказа элементов технической системы: интенсивности, либо вероятности отказа на требование. Различают два типа таких данных – "общие" и "специализированные".

Первые касаются данных, полученных для интересующего элемента без учета такой важной информации, как различия, [147]:

- в конструкции;
- изготовителе;
- принятой схеме обслуживания и ремонта;
- условиях эксплуатации;
- задании границ определения типа данного объекта.

В результате неучета данных обстоятельств различия в величине параметра, заимствованной из баз данных общего типа, могут составлять от 3 до 100, таблица 1.3:

Таблица 1.3 – *Пример диапазона значений параметров отказов насоса, согласно таблице 6.3 [147]*

Тип элемента	Тип отказа	Диапазон значений
Насос с приводом от дизельного двигателя	Отказ запуска	$3 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-2}$
	Отказ во время работы	$1 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}$
Насос с приводом от электродвигателя	Отказ запуска	$3 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-2}$
	Отказ во время работы	$1 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$
Насос с приводом от газовой турбины	Отказ запуска	$3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2}$
	Отказ во время работы	$1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$

Данная проблема известна давно, она упоминалась еще в отчете "WASH-1400". Использование данных, полученных из разных источников, зачастую давало различие в два и даже три порядка величины. При этом специальные базы данных, основанные на стати-

стике эксплуатации реакторов АЭС, на время разработки отчета "WASH-1400" отсутствовали, [228].

Данному вопросу, с учетом его важности, авторы "WASH-1400" посвятили отдельное исследование. В ходе его выполнения были тщательно проанализированы все используемые справочные данные на предмет их пригодности для поставленной задачи. Было принято решение аппроксимировать распределение вероятности величины интенсивности отказов между имеющимися граничными значениями логнормальной функцией. В результате, на завершающем этапе этого исследования, после многократных прогонов методом Монте-Карло, были получены количественные оценки, которые авторы отчета охарактеризовали как обладающие "разумной точностью", [228].

В этом отношении базы данных специального типа существенно лучше – в них значения параметров сгруппированы с учетом вышеуказанных различий. Однако специальные базы данных обладают собственными недостатками:

- а) их существенно меньше;
- б) доступ к ним, как правило, ограничен;
- в) с учетом меньшей статистики, неопределенность типа А (стохастическая) у них больше.

Среди других источников ПаН отчет US NRC [237] называет:

- а) искажения в базах данных;
- б) случайность выборки, принятой для оценки величины параметра.

Еще на один источник параметрической неопределенности указывают авторы отчета EPRI [221] – это постулируемый тип распределения вероятности для параметров. Наиболее часто принимают логарифмически нормальный тип распределения, однако неопределенность, связанная с этой гипотезой (уровень-2), в большинстве случаев не оценивается. Например, отчет [211] рекомендует использовать типы функции распределения вероятности, перечисленные в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – *Типы функции распределения вероятности, которые могут быть использованы при моделировании параметрической неопределенности*

Тип функции распределения вероятности	Применимость
Равномерное (логарифмически равномерное)	Для случаев, когда может быть установлен диапазон (могут быть определены максимальные и минимальные значения) на основе физических соображений, экспертных суждений или исторических данных. Если диапазон значений параметров велик (больше чем один порядок величины), предпочтительнее логарифмически равномерное распределение

Окончание таблицы 1.4

Тип функции распределения вероятности	Применимость
Треугольное (логарифмически треугольное)	Когда существующая информация обладает малой надежностью, но известны экстремумы и наиболее вероятные значения (как правило, на основе экспертных суждений). Если величина параметров принадлежит к широкому диапазону, следует предпочесть логарифмически треугольное распределение
Эмпирическое (кусочно-равномерное)	Полезно, когда имеются некоторые надежные данные, которые не могут быть представлены стандартными статистическими распределениями
Нормальное	При наличии значительного количества соответствующих данных. Может представлять случайные ошибки, связанные с аддитивными процессами. Полезно для моделирования симметричных распределений многих природных процессов и явлений. Часто используется как распределение по умолчанию для представления неопределенности
Логарифмически нормальное	Полезно в качестве асимметричной модели для параметров, выражающих отношение величин. Например, приемлемо для представления таких физических величин, как концентрация
Пуассона	Показано для описания частоты случайных, независимых событий в рамках заданного временного интервала
Бета	Часто используется для представления суждений о неопределенности. Также ограничено использованием случайных, равномерно распределенных параметров

В ряде отчетов отмечается важность такого источника ПаН, как наличие "общей причины", при наличии которой предположение о независимости событий (в частности, отказов элементов) является неадекватным. Разработаны специальные меры для выявления и учета эффекта такой зависимости (в т.ч. – статистической). Общая причина может иметь, например, физическую природу – являться некоторым физическим воздействием, оказываемым на все элементы технической системы. Иной вариант ее реализации связан с человеческим фактором, таким, например, как качество технического обслуживания или ремонта оборудования персоналом.

Завершая рассмотрение вопроса о роли и происхождении неопределенности результатов моделирования, следует указать на известный парадокс, связывающий параметрическую и модельную неопределенность.

Он заключается в том, что далеко не всегда "богатая", физически содержательная модель, учитывающая большее количество действующих факторов, дает результаты с меньшей неопределенностью по сравнению более с простой моделью. Это объясняется тем, что сложная модель включает большее число параметров, каждый из которых

имеет собственную неопределенность. В итоге неопределенность результата расчета по сложной модели зачастую оказывается большей, чем по простой.

## **1.6 Обзор подходов к оценке неопределенности техногенного риска**

Как известно, оценивание любого параметра возможно тремя способами:

- а) качественно (лингвистически);
- б) полуколичественно (экспертно – в баллах некой условной шкалы);
- в) количественно – в результате прямого или косвенного измерения, либо расчетом по математической модели, [49].

При этом количественный способ может быть реализован только при наличии меры исследуемой величины, в таком случае численное значение объективно отражает количество единиц меры, содержащейся в ней.

Оценивание неопределенности результатов (а также промежуточных параметров) техногенного риска не является исключением – на практике используются все три способа ее оценивания. При этом с учетом того, что количественное оценивание неопределенности является достаточно трудоемкой процедурой, вполне логичным являются предложения регулировать степень детализации при ее выполнении – в зависимости от типа решаемой задачи:

- 1) оценка объекта на предмет выполнения нормативных (например, лицензионных) требований;
- 2) сравнение альтернативных проектных решений.

### **1.6.1 Способы качественного оценивания неопределенности**

Качественные методы оценки неопределенности довольно обстоятельно освещены в проекте отчета ИПС [155]. В нем со ссылкой на статью Уолкера (Walker) с коллегами [242] предлагается качественно оценивать неопределенность риска по трем параметрам (см. рисунок 1.6). Каждое из трех "измерений" неопределенности оценки рекомендовано оценивать лишь качественно: "низким", "средним" и "высоким" уровнем. Для присвоения уровню неопределенности одного из этих трех значений отчет [155] предлагает экспертные таблицы 1.5 ÷ 1.8.

Приведены следующие пояснения:

- низкий уровень неопределенности присваивается в ситуации, когда большая вариация параметра приводит к незначительному изменению результата;
- средний уровень – в случае пропорционального отклика;
- высокий уровень неопределенности соответствует случаю, когда небольшое изменение параметра вызывает существенно бóльшую реакцию результата.

Очевидно, что подобная постановка задачи требует предварительной оценки параметрической чувствительности моделей.

Кроме того, указания, как отличить "большой" отклик от "малого", отсутствуют.



Рисунок 1.6 – Трехмерная характеристика неопределенности, [155]

Таблица 1.5 – Экспертная таблица для оценки характеристики "уровень неопределенности"

Уровень Критерий	Низкий уровень неопределенности	Средний уровень неопределенности	Высокий уровень неопределенности
Качество результатов оценки	известны как результат, так и тип распределения	известен результат, но неизвестен тип распределения	неизвестны ни результат, ни тип распределения

Таблица 1.6 – Критерии оценки характеристики "качество базового знания"

Критерий	Подходы к оцениванию
Точность	1) идентификация базового знания, необходимого для получения информации об интересующей величине; 2) выявление споров и противоречий относительно базового знания; 3) выявление наиболее "темных пятен" в доступном знании; 4) определение влияния этих "темных пятен" на качество результата; 5) оценка допущений, принятых с целью ликвидации пробелов в знании

## Окончание таблицы 1.6

Критерий	Подходы к оцениванию
Надежность	1) строго критичное оценивание базового знания, как по методологическим соображениям, так и по имеющимся фактам; 2) идентификация научного статуса базового знания; 3) качественная оценка обоснованности базового знания; 4) оценка приемлемости экспертных суждений по уровню доверия
Достоверность	1) определение полноты базового знания; 2) осознание областей незнания в используемом знании; 3) осознание возможности будущих изменений в основаниях базового знания; 4) рассмотрение достоверных фактических данных
Научная состоятельность	1) оценка состоятельности научной базы; 2) оценка зрелости (степени проработанности) научной базы; 3) оценка ограничений, накладываемых научной методологией; 4) анализ степени, с которой основания базового знания соответствуют фундаментальным общенаучным концепциям
Обоснованность	1) оценка предсказательной силы базового знания; 2) оценка функциональных зависимостей, положенных в его основу

"Субъективность выбора" можно оценить с помощью аналогичных таблиц 1.7 – 1.8.

Таблица 1.7 – *Критерии оценки характеристики "субъективность выбора"*

Критерий	Подходы к оцениванию
Пространство выбора	наличие веера альтернативных вариантов
Взаимодействие между экспертом и заинтересованными участниками	1) уточнение схожести альтернатив (как экспертом, так и прочими заинтересованными участниками); 2) уточнение противоположности альтернатив (как экспертом, так и прочими заинтересованными участниками)
Влияние ограничений (финансовых и т.п.)	определение влияния подобных ограничений на выбор альтернативы
Наличие "конфликта интересов" эксперта	оценка возможного влияния "конфликта интересов" эксперта на выбор альтернативы
Влияние выбранного варианта на результат	оценка влияния выбранной альтернативы на результат

Таблица 1.8 – *Экспертная таблица для оценки уровня неопределенности характеристики "субъективность выбора"*

Уровень / Критерий	Низкий уровень неопределенности	Средний уровень неопределенности	Высокий уровень неопределенности
Пространство выбора	сложно принять приемлемость любой альтернативы	ограниченный выбор приемлемых альтернатив	богатый выбор приемлемых альтернатив
Надежность	использована наилучшая доступная практика	ограниченное согласие относительно надежности	отсутствие видимых оснований

Окончание таблицы 1.8

Критерий \ Уровень	Низкий уровень неопределенности	Средний уровень неопределенности	Высокий уровень неопределенности
Интерсубъективность выбора	подобный выбор (альтернативы) могут сделать многие	подобный выбор (альтернативы) могут сделать немногие	мало кто может выбрать подобную альтернативу
Влияние ограничений	на делаемый выбор трудно повлиять	имеется умеренное влияние на выбор альтернативы	принципиально иной выбор в условиях ограничений
Чувствительность выбора	выбор из альтернатив малочувствителен	умеренная чувствительность	достаточно чувствительный выбор
Влияние на результат	только локальное влияние	сильное влияние на связанные события	существенное влияние на результат оценки в целом (индикатор)

Экспертные таблицы 1.5 ÷ 1.8 полезны для лучшего понимания происхождения неопределенности любого параметра, хотя обращает на себя внимание отсутствие заметных различий между критериями "надежности" и "достоверности" в таблице 1.6, [49].

### 1.6.2 Полуколичественные методы оценки неопределенности

В отличие от качественных, лингвистических (низкий или высокий, большая или малая) полуколичественный способ позволяет получать численные оценки. Однако в данном случае не следует поддаваться "магии чисел", надо четко осознавать, что за каждым таким числом (или баллом) стоит субъективное суждение человека, [49].

Вообще говоря, экспертные суждения чрезвычайно укоренены в теории КОР, поскольку оба компонента техногенного риска – как вероятность, так и ущерб – часто оцениваются субъективно (или интерсубъективно):

- в основании "вероятностного" компонента лежит понятие субъективной (байесовой) вероятности;
- оценка ущерба опирается на множество соглашений (одно из самых известных – оценка стоимости человеческой жизни).

В этой связи чисто количественных методов, являющихся типичными для естественных наук (оперирующих результатами измерений или расчетов), в области КОР немного. Могут возразить, что процедура байесова уточнения позволяет корректировать постулируемые значения с учетом вновь полученных фактов. Это так, но факт – всегда частная вещь, в науке он может использоваться для подтверждения (или опровержения) некоторых идей более общего типа. Если таких частных фактов накапливается много,

индуктивный метод позволяет сформулировать некоторую объясняющую их теорию (всегда имеющую притом ограниченную сферу применимости), [49].

Полуколичественный способ оценивания предполагает экспертное назначение интервала неопределенности – обычно с помощью "фактора неопределенности" UF, которому присваивается то или иное численное значение. В некоторых случаях UF приписывают значение из интервала  $2 \div 15$ , чаще используется диапазон  $2 \div 100$ . Таким образом, принимается гипотеза, что истинное значение параметра с некоторой доверительной вероятностью находится в границах интервала, отношение верхнего граничного значения которого к нижнему и составляет величину UF. В случае равномерного или нормального типа распределения вероятности наиболее вероятному значению отвечает середина интервала, в случае логнормального – среднее геометрическое из его граничных значений.

### 1.6.3 Методы количественной оценки неопределенности

Собственно методам КОН посвящена обширная литература – отчеты, монографии и обзоры [133], [134], [140], [144], [161], [163], [167], [197], [198], [211], [221], [222], [225], [241], [244], [253], многочисленные статьи. К сожалению, подавляющая часть работ по данной тематике опубликована на английском языке. Для получения количественных оценок неопределенности инженерных расчетов, пожарного риска и риска аварий, предложено значительное число методов.

По мнению Б.Д.Кауфмана, [37], эти методы в порядке убывания их информационной обеспеченности можно ранжировать следующим образом: а) детерминированное описание (неопределенность равна 0); б) вероятностная постановка; в) использование нечетких чисел; г) методы теории возможностей; д) интервальная постановка; е) многочисленные комбинированные (гибридные) методы.

В начальный период развития КОР неопределенность параметров логико-вероятностных моделей и результатов моделирования в целом количественно оценивалась детерминированными и вероятностными методами, которые можно назвать классическими, а также их комбинацией.

Анализ и количественное оценивание неопределенности техногенного риска тесно связаны с такими аналитическими процедурами, как анализ *важности* факторов модели и анализ ее *параметрической чувствительности (значимости параметров)*. Рекомендуется, чтобы эти процедуры предшествовали детальной КОН, позволяя оценить вклад различных факторов в неопределенность результата.

Как известно, если для оценки вероятности событий аварийного процесса применяется классический метод анализа деревьев отказов (ДО), то вероятность головного события  $P_{\text{top}}$ :

$$P_{\text{top}} = \sum_{i=1}^n \text{cutset}_i, \quad (1.1)$$

где  $\text{cutset}_i$  –  $i$ -е минимальное проходное сечение (МПС <sub>$i$</sub> );

$n$  – общее число МПС.

При этом каждое  $i$ -е минимальное проходное сечение

$$\text{cutset}_i = \prod_j P_{ij}, \quad (1.2)$$

где  $P_{ij}$  – вероятность реализации  $j$ -го события  $i$ -го минимального проходного сечения.

Для выполнения анализа важности событий CPR-12E [147] рекомендует следующие методы:

а) *метод Фусселля-Везеля*, заключающийся в расчете фактора важности события  $E$ . Фактор Фусселля-Везеля  $I_{\text{FV}}(E)$  оценивает вклад всех сценариев, содержащих событие  $E$ :

$$I_{\text{FV}}(E) = \frac{\sum_{i=1}^m \text{cutset}_i(E)}{P_{\text{top}}}, \quad (1.3)$$

где  $\text{cutset}_i(E)$  –  $i$ -е минимальное проходное сечение, содержащее событие  $E$ ;

$m$  – число МПС, включающих событие  $E$ ;

б) *метод Бирнбаума*. Фактор Бирнбаума  $I_{\text{B}}(E)$ , рассчитываемый следующим образом:

$$I_{\text{B}}(E) = P_{\text{top}}(E) - P_{\text{top}}(\bar{E}), \quad (1.4)$$

где  $P_{\text{top}}(E)$  – вероятность головного события при условии, что событие  $E$  достоверно происходит;

$P_{\text{top}}(\bar{E})$  – то же, но при условии, что событие  $E$  достоверно не происходит;

в) *метод цены риска RAW(E)*, оцениваемой по отношению

$$\text{RAW}(E) = \frac{P_{\text{top}}(E)}{P_{\text{top}}(\bar{E})}. \quad (1.5)$$

Существуют и иные методы оценки важности фактора (события)  $E$ .

Целью метода оценки чувствительности является получение отклика результата ЛВМ при варьировании того или иного параметра. В классической версии анализ чувствительности выполняется следующим образом:

1) ЛВМ должна быть реализована в виде компьютерной программы (или хотя бы системы математических уравнений);

2) для каждого параметра ЛВМ задаются область допустимых значений и тип распределения вероятности внутри этой области;

3) на следующем шаге выполняется имитационное (статистическое) моделирование методом Монте Карло – с помощью генератора случайных чисел с заданным типом распределения исследуемому параметру присваивается случайное значение, для которого выполняется расчет результата по ЛВМ. Затем эта процедура многократно повторяется, в итоге накапливается статистика результата расчетов  $G$ , которая позволяет выполнить количественные оценки – математическое ожидание, дисперсию, либо фактор ошибки EF (аналог фактора неопределенности UF):

$$EF = \sqrt{\frac{G_{0.95}}{G_{0.05}}}, \quad (1.6)$$

где  $G_{0.95}$  и  $G_{0.05}$  – верхняя и нижняя границы 95 %-го доверительного интервала величины  $G$ , соответственно.

Наряду с фактором неопределенности иногда используют т.н. *range factor*:

$$RF = \frac{G_{0.95}}{G_{middle}}, \quad (1.7)$$

где  $G_{middle}$  – среднее значение результата.

Таким образом, статистическое моделирование выполняется методом Монте Карло, изобретенным, как утверждает Экхард (Eckhard), [156], Джоном фон Нейманом и Станиславом Уламом во второй половине 40-х годов прошлого века.

Число необходимых "прогонов" (итераций) в методе Монте Карло может быть оценено, [4]:

а) сверху – неравенством Чебышева;

б) снизу – с использованием предельной теоремы Ляпунова.

Наряду со статистическим моделированием (Монте Карло), анализ чувствительности параметров ЛВМ грубо можно оценить первым членом ряда Тейлора – дифферен-

цированием уравнения ЛВМ по интересующему параметру и приравниванием коэффициента чувствительности к величине полученной первой производной. ГОСТ Р 51901.5-2005 [28] называет этот способ методом моментов. Однако данный метод несвободен от недостатков, [211], поскольку не позволяет учесть: а) наличие взаимных связей между параметрами; б) нелинейность связи.

В Руководстве [222] подчеркивается, что процесс КОИ и анализ чувствительности – это два взаимосвязанных процесса, которые в оптимальном варианте должны выполняться параллельно по итерационному принципу.

Чрезвычайно важным требованием при выполнении любого отчета по КОИ, да и КОР в целом, является требование тщательного документирования всех этапов работы, включая:

- описание принятой концептуальной модели;
- задание области ее применения;
- характеристику допущений, принятых при формировании концептуальной модели;
- описание сделанных при этом упрощений;
- сведения об источниках информации при задании величины всех параметров модели;
- характеристику компьютерной реализации модели и метода решения, используемых при этом ограничений и упрощений.

Требование тщательного документирования содержится практически во всех цитированных выше Руководствах по выполнению КОР. Документирование делает результат проверяемым, дает возможность выполнить независимую оценку правильности и обоснованности полученных результатов.

Еще одно важнейшее требование заключается в тотальном запрете на использование точечных значений параметров, вместо них рекомендовано либо интервальное, либо – оптимально – вероятностное представление (в виде функции плотности вероятности, или функции накопленной вероятности).

Для количественной оценки неопределенности параметров аварийного риска представляет интерес указание отечественного метрологического Руководства Р 50.1.060-2006 [82], которое содержит количественные критерии, позволяющие оценить вклад различных параметров модели в неопределенность величины, являющейся результатом вычислений. Так, вкладом любого параметра согласно [82] в суммарную неопределенность ввиду его

малости можно пренебречь, если отношение дисперсии параметра  $y_i$  к дисперсии самой величины  $Y$  не превышает 20%:

$$\frac{u^2(y_i)}{u^2(Y)} < 0.2. \quad (1.8)$$

С другой стороны, согласно [82] вклад параметра  $y_j$  следует считать доминирующим, если

$$\frac{u^2(y_j)}{u^2(Y)} > 0.74. \quad (1.9)$$

По мнению U.S. NRC, неопределенность любого параметра ЛВМ, либо результата оценки в целом (метрики техногенного риска) считается вполне приемлемым, когда UF оценен величиной из интервала  $2 \div 10$ .

Анализ доступной литературы показал, что в настоящее время количественная оценка модельной неопределенности пока остается наиболее сложной частью КОН в целом. Во многом это объясняется тем обстоятельством, что источники МоН в основном имеют эпистемическую природу. Для ее количественной оценки CPR-18E [150] предлагает воспользоваться таким очевидным приемом, как сравнение результатов, полученных расчетом по различным моделям – либо между собой, либо – с фактами (экспериментальными данными). Последний вариант являет собой классическую процедуру экспериментальной валидации модели – окончательное слово всегда остается за корректно поставленным опытом. Однако в области техногенного риска (пожарного или риска аварии) натуральный эксперимент возможен далеко не всегда...

Модельную неопределенность в сравнительной постановке можно количественно оценить и в чисто расчетном эксперименте – если принять одну из моделей в качестве эталонной. Однако этот сравнительный способ, как отмечает М.Абрахамссон [134], обладает очевидным недостатком – неопределенность будет явно недооценена, если различные модели используют общие элементы (предположим, ссылаются для задания величины параметров на одни и те же данные).

В проекте отчета U.S. NRC [225] указывается, что в настоящее время крайне сложна в корректном исполнении количественная оценка неопределенности, привносимой таким фактором, как неполнота концептуальной модели. Очевидно, что это общенаучная проблема.

Отчет EPRI [221] также предлагает оценивать модельную неопределенность, сравнивая альтернативные модели. Согласно его рекомендации в отсутствие альтернатив количественная оценка МоН невозможна в принципе (возможны только качественные оценки).

Несколько иной подход к КОН предлагает RG 1.174 [233] (U.S. NRC, 2002). Его подход универсален, поскольку основан на варьировании:

а) для оценки модельной неопределенности используется варьирование структуры модели. Стандарт [137] уточняет, какие это могут быть вариации: введение новых начальных событий, изменение вероятности базовых событий, варьирование величины критерия успеха срабатывания защиты и т.п.;

б) для оценки параметрической неопределенности применяется варьирование величины параметров, т.е. классический метод Монте Карло.

С учетом эпистемической природы МоН при ее оценке следует по возможности максимально полно учитывать различные эффекты, вызванные дефектами мышления (разного рода ошибками, предвзятостью, незнанием и т.д.). По-видимому, именно Апостолакис (Apostolakis) был первым, [224], указавшим на эффект возможной корреляции между двумя или более событиями дерева отказов, способный существенно исказить результаты КОН. Если эту связь игнорировать, то, как математическое ожидание, так и дисперсия головного события получатся ошибочными.

Другим эффектом из этого ряда является такое явление, как SOKC (State-Of-Knowledge-Correlation), [221] – корреляция состояния знаний, или "эпистемическая корреляция", которое способно существенно исказить оценки и, следовательно, сообщить дополнительную неопределенность результату. Если этот эффект налицо, предположение о независимости сомножителей неверно, и среднее произведения оказывается больше, чем произведение средних, то же самое касается и дисперсии произведения.

Таким образом, обобщая сказанное, следует заключить, что, по мнению авторов цитированных источников литературы, с учетом эпистемической природы модельной неопределенности любые ее количественные оценки условны, в лучшем случае могут быть получены полуколичественные оценки.

Проект отчета NUREG-1855 [225] констатирует, что ко времени его написания (2007 год) методы количественной оценки параметрической неопределенности в целом освоены неплохо, по большей части при этом используются методы статистического моделирования. Однако надо отдавать себе отчет в том, что речь идет о проблеме КОП в области

ядерной безопасности США. Это довольно узкая область, в которой работает высококвалифицированный персонал, номенклатура типов технических устройств в ней не слишком широка, имеются полноценные специальные базы данных по параметрам надежности элементов оборудования. Как уже не раз отмечалось нами, чаще всего для задания типа распределения вероятности внутри интервала неопределенности постулируется логарифмически нормальное распределение.

Хорошо известно, что в теории анализа риска с точки зрения практического использования получили распространение две основные трактовки вероятности: частотная и субъективная, спор их адептов не прекращается до сих пор. Между тем в таблице 4.1 [225] достаточно убедительно показана малая приемлемость частотной трактовки вероятности для выполнения ЛВМ безопасности технических систем:

Таблица 1.9 – *Интерпретация вероятности при использовании ЛВМ, [225]*

Байесов подход (субъективная вероятность)	Частотный подход
Учитывая, что байесова вероятность может быть интерпретирована как вероятностное утверждение о параметре, она может быть легко объединена с прочими источниками неопределенности при выполнении ЛВМ	Доверительный интервал не может быть непосредственно интерпретирован как вероятность того, что величина параметра лежит внутри него
Байесово распределение вероятности может быть "перенесено" с использованием ЛВМ (деревьев отказов и событий)	Трудно, либо невозможно "переносить" частотный доверительный интервал с использованием дендрограмм отказов и событий для оценки интервала неопределенности головного события

На это же обстоятельство указывает Винклер (Winkler) в своей работе [245]. Важный аспект проблемы подчеркивает американский стандарт [137], согласно которому после выполнения процедуры байесова уточнения необходимо убедиться в том, что полученное апостериорное распределение осмысленно – достаточно гладкое, неполимодалное, полученные средние значения имеют разумную величину.

Укажем на одно очень важное обстоятельство – вероятностные методы КОИ на самом деле пригодны лишь для элементов массовых серий, работающих в примерно равных условиях эксплуатации (что имеет место, например, в ядерной энергетике). Такие элементы принадлежат к одной генеральной совокупности и потому обладают устойчивыми параметрами (функцией плотности вероятности, и, соответственно, моментами – средним, дисперсией и т.д.). В подобных случаях имеет смысл использовать вероятностное описание и постулировать тип распределения вероятности. Однако это важнейшее

требование выполняется далеко не всегда, поэтому вероятностные методы для целей КОН имеют ограниченную область применимости.

Объекты ядерной энергетики являются лишь одним из типов технических систем, порождающих техногенную опасность. Многообразие же всех типов технических систем очень велико. С учетом этого соображения следует заключить, что аналитики, работающие в сфере КОР ядерных реакторов, находятся в несколько привилегированном положении, поскольку конструкции реакторов, их элементная база относительно однородны. Их коллегам, которым приходится оценивать риск любых технических объектов, приходится намного сложнее.

Подобная однородность позволила разработать в сфере ядерной безопасности США руководящие документы с большой степенью формализации [137], [225]. В них удалось дать не только исчерпывающий список источников неопределенности, проверить, является ли каждый из них "ключевым", но и предложить методы КОН трех уровней рассмотрения (по глубине и детальности анализа). Техническая схожесть объектов позволила предложить единую метрику риска – CDF (частота событий, чреватых ущербом для активной зоны реактора).

В ряде случаев при КОР практикуется метод границ ("граничный анализ"), разработанный Скоттом Ферсоном (Ferson). В его рамках принимается допущение, что будет реализован наихудший из всех мыслимых сценариев аварии (как по вероятности, так и по ущербу). Недостаток данного метода очевиден – поскольку при выполнении граничного анализа область допустимых значений всех параметров назначается экспертно, всегда существует возможность того, что значение параметра, отвечающее еще более драматичному исходу, будет упущено, [225].

Количественная оценка неопределенности может быть выполнена также и в детерминистической постановке – с использованием фактора неопределенности UF, либо интервальных чисел. Интервалы используются для количественной характеристики так называемой ограниченной неопределенности. Интервальный анализ (раздел математики, изучающий операции с интервальными числами) берет свое начало от работы Розалинды Янг [251], вышедшей в 1931 году. В качестве интервалов она рассматривала ограниченные отрезки вещественной числовой оси, назвав эти объекты многозначными величинами. В той статье ею были предложены, в частности, четыре правила выполнения арифметических действий над интервальными величинами:

если  $X = [x_1, x_2]$ ;  $Y = [y_1, y_2]$  - интервальные числа

$$X + Y = [x_1 + y_1, x_2 + y_2];$$

$$X - Y = [x_1 - y_2, x_2 - y_1];$$

$$X \cdot Y = [\min(x_1 \cdot y_1, x_1 \cdot y_2, x_2 \cdot y_1, x_2 \cdot y_2), \max(x_1 \cdot y_1, x_1 \cdot y_2, x_2 \cdot y_1, x_2 \cdot y_2)];$$

$$X / Y = [\min(x_1 / y_1, x_1 / y_2, x_2 / y_1, x_2 / y_2), \max(x_1 / y_1, x_1 / y_2, x_2 / y_1, x_2 / y_2)]^* .$$

\* при условии  $0 \notin [y_1, y_2]$

Начальный период развития интервального анализа часто называют "наивным". Эта начальная, "наивная" версия интервального анализа неоднократно вызывала заслуженные упреки в свойственной ей повышенной вычислительной неопределенности. Недостатки этой первоначальной версии во многом препятствовали широкому использованию интервальных расчетов, в том числе для целей КОН. Подробнее интервальная постановка КОН будет рассмотрена в завершающем разделе настоящей главы.

Как уже было отмечено, для целей КОН могут использоваться нечеткие числа (fuzzy sets). Данный способ наиболее адекватен целям формализации экспертных суждений. Таким образом, сравнительно с интервальной оценкой параметра, нечеткое его представление его величины отличается большей информативностью, однако сама эта информация включает изрядную эпистемическую (субъективного свойства) неопределенность. В этом отношении она проигрывает информативности статистической (объективной).

В ряде статей: Арунраи (Arunraj) с соавторами [136], Сиюты (Siuta) с соавторами [217], показано, что выполнение КОН в рамках анализа нечетких чисел существенно менее затратно по времени, нежели традиционное статистическое моделирование. Математические операции с нечеткими числами при задании функции принадлежности могут быть выполнены средствами интервального анализа.

Между тем отчет US NRC 2009 года [238] показал, что такой способ представления неопределенности обладает серьезным недостатком, связанным с тем, что этот тип представления невозможно объединить, например, в рамках процедуры байесова уточнения, с другими типа неопределенности. Несколько ранее Р.Кук в своей монографии [144], ссылаясь на работы Френча (French) [164], [165] показал невозможность использования нечетких чисел для представления и количественного оценивания неопределенности при количественной оценке риска аварий. Именно, по мнению Френча, любой способ представления неопределенности должен соответствовать трем обязательным требованиям:

- 1) обладать способностью учитывать взаимодействие между элементами;
- 2) иметь возможность корректного учета измерительной неопределенности данных;

3) обладать способностью предложить критерий для отличия "хорошего" представления неопределенности от "плохого".

Метод fuzzy sets этим требованиям не отвечает. Более того, он является достаточно произвольным, поскольку предполагает постулирование вида своей "функции принадлежности".

На сегодняшний день наиболее распространенным, и, одновременно, трудоемким по исполнению методом количественной оценки параметрической неопределенности, является однопараметрический (1D) метод Монте Карло. При его использовании, прежде всего, необходимо задать тип распределения вероятности, что во многих случаях проблематично, т.к. порождает неопределенность уровня-2. Таким образом, на самом деле метод статистического моделирования далеко не универсален.

Даже в тех случаях, когда применение вероятностных методов оправдано, при их использовании следует соблюдать осторожность – в [50] приведен пример, показывающий, что в случае логнормального распределения параметр, равный отношению двух параметров с одинаковыми средними, но различными дисперсиями, может иметь фактор ошибки (UF), равный 105!

В отчете МАГАТЭ [183] 1989 года отмечается, что для задания неопределенности параметров в вероятностной постановке предпочтительнее пользоваться функцией накопленной вероятности, нежели плотностью вероятности.

Что касается оценки параметрической неопределенности в целом, отчет [183] рекомендует следующую последовательность действий:

- 1) дать перечень всех источников ПаН, чей вклад в общую неопределенность весом;
- 2) для всех таких параметров задать область допустимых значений;
- 3) внутри этого диапазона задать функцию накопленной вероятности – вероятность того, что величина параметра превысит данное значение;
- 3) оценить имеющуюся зависимость между параметрами модели;
- 4) установить плотность субъективной вероятности для объединенной области значений параметров;
- 5) выполнить количественную оценку ПаН;
- 6) ранжировать параметры модели по их вкладу в бюджет неопределенности;
- 7) представить результаты КОН.

В последние годы опубликовано большое число работ, авторами которых предложены многочисленные гибридные методы выполнения КОН:

а) Арунраи (Arunraj) с соавторами [136] – комбинация fuzzy sets и метода Монте Карло;

б) Джианг (Jiang) с соавторами [187] – методы гибридного вероятностно-интервального анализа;

в) Мохтариан (Mokhtarian) с соавторами [200] – использование интервально-значных нечетких чисел;

г) Занг (Zhang) с соавторами [252] – комбинированный метод, названный ими "интервальным квази Монте Карло методом";

д) Ву (Wu) с соавторами [247], [248], [249] – модифицированные интервальные подходы, использующие полиномиальный хаос и Чебышевские полиномы.

Приведенный перечень новых идей о методах выполнения КОИ далеко не полон. Представляется очень перспективной идея оценки техногенного риска – как пожарного, так и риска аварий (с сопутствующей КОИ) – методом конечно-элементного анализа в интервальной постановке.

### **1.7 Интервальная постановка задачи оценки риска**

Выше нами проанализированы основные подходы, используемые в в риск-анализе для выполнения необходимых оценок с учетом наличия у параметров модели неопределенности. С нашей точки зрения, весьма эффективным математическим формализмом для выражения и количественной оценки ограниченной неопределенности в задачах подобного типа является интервальный анализ. Основным преимуществом интервального представления параметрической неопределенности является то, что оно не требует никаких дополнительных предположений о распределении величины параметра внутри границ рассматриваемого интервала.

В условиях отсутствия статистической устойчивости такой информации нет и быть не может, поэтому постулирование того или иного типа распределения вероятности (равно как и вида функции принадлежности) является делом произвольным и несет в себе значительную скрытую неопределенность.

Между тем еще Т.Байес выдвинул постулат, согласно которому в отсутствие какой-либо априорной информации следует считать такое распределение равномерным (прямоугольным). Сам Томас Байес настолько был неуверен в справедливости этого постулата, что не решился его опубликовать при жизни (постулат Байеса был опубликован посмертно). Этот постулат Байеса неоднократно подвергался заслуженной критике.

Скотт Ферсон с соавторами, [160], отметил, что в ряде измерительных задач возникает ситуация, когда использование прямоугольного распределения вероятности неуместно – в частности, в цензурированных снизу измерениях. Подобные измерения всегда имеют место, когда интенсивность измеряемой величины находится ниже порога обнаружения средства измерения. В подобных случаях в протоколах измерений записывают "не обнаружено". Это запись означает, что интенсивность сигнала может быть какой угодно, от 0 до 100% предела обнаружения, и нет никаких оснований утверждать, что вероятность ее нахождения в любом подинтервале пропорциональна его ширине. В работе [160] перечислены восемь ситуаций, в которых количественная оценка неопределенности наиболее адекватна именно в интервальном представлении, в виде интервальных величин.

Долгое время широкому использованию интервального подхода в инженерном деле в целом, при выполнении КОР в частности, препятствовали известные недостатки "наивной" его версии, из-за которых ширина результатов интервальных вычислений оказывалась сугубо переоцененной. Это наблюдалось в следующих случаях: а) параметр входил в расчетное соотношение более одного раза; б) имела место связность параметров расчетного соотношения; в) из-за т.н. эффекта обертывания (wrapping effect).

В рамках интервального анализа разработаны эффективные методы подавления этих его негативных особенностей, [128], [130]. К настоящему времени в пакетах интервального анализа, например, INTLAB, являющимся интервальным приложением MATLAB, имеются команды, облегчающие применение данных методов. Это важное обстоятельство открывает дорогу широкому использованию интервального подхода – как в инженерном деле, так и в области безопасности для целей риск-ориентированного подхода.

Представляет интерес сравнение интервального подхода к выполнению КОН с традиционным вероятностным подходом. Если предположить, что величина некоего параметра изменяется в некотором интервале, причем эти изменения обладают статистической устойчивостью, сравнение возможно. Подобный сравнительный анализ неоднократно выполнялся, его результаты широко освещены в зарубежной и отечественной литературе. Из последних работ отечественных авторов можно указать на работы [100], [130]. Отметим, что в статье К.К.Семенова [100] выполнена оценка необходимого числа прогонов при статистическом моделировании методом Монте Карло для получения требуемой доверительной вероятности.

## 1.8 Выводы по главе 1

В качестве основных выводов, которые могут быть сделаны на основании материала настоящей главы, назовем следующее:

- 1 В силу ряда причин, как объективного, так и субъективного свойства, любые количественные значения, полученные в рамках процедуры количественной оценки ава-

рийного риска, обладают неопределенностью. Точечные оценки этих величин являются лишь очень грубым приближением.

2 Понятие "неопределенность", возникшее в науке несколько ранее понятия "риск", имеет двоякий смысл – качественный и количественный. С учетом генеральной задачи риск-ориентированного подхода – разработки инструментария для максимально возможной объективизации всего процесса управления пожарной и промышленной безопасностью – неопределенность должна получить количественное выражение. Поэтому в теории анализа пожарного риска, подобно современной метрологии, неопределенность используется для количественной оценки диапазона численного значения, которое обоснованно может быть приписано любому параметру риска.

3 Постановка задачи количественной оценки неопределенности результатов, полученных в результате моделирования, является одной из заслуг перед наукой теории анализа техногенного риска, поскольку это проблема общенаучного типа. Есть основания полагать, что уже в ближайшей перспективе научный стандарт сделает обязательным сопровождение любого численного значения, полученного расчетом, количественной оценкой неопределенности – подобно тому, как это давно уже является нормой в экспериментальных исследованиях.

4 Адекватная количественная оценка неопределенности параметров риска аварий на протяжении трех десятков лет остается одной из ключевых проблем этой методологии, что подтверждается результатами неоднократно проведенных специальных сравнительных экспериментов – *bench mark studies*.

5 Систематические исследования данной проблемы были начаты в США в начале 70-х годов прошлого века, в настоящее время они интенсивно продолжаются в странах Старого и Нового Света. В России заметно существенное отставание в разработке методического обеспечения по количественной оценке неопределенности пожарного (аварийного) риска.

6 Вероятностные методы, рекомендуемые многими Руководствами по КОР как наилучшие для целей количественной оценки неопределенности, не универсальны. Они пригодны лишь при наличии статистической устойчивости, которая обычно имеет место для элементов массовых серий, работающих в примерно равных условиях эксплуатации. Поскольку данное важнейшее требование выполнено далеко не всегда, вероятностное описание, равно как и метод статистического моделирования для целей количественной оценки параметрической неопределенности, имеет ограниченную область применимости.

7 Интервальная постановка задачи выполнения КОИ является универсальной и может быть рекомендована к широкому использованию при условии принятия мер по подавлению вычислительной неопределенности, присущей интервальным расчетам.

## ГЛАВА 2 АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ АВАРИЙНОГО РИСКА: ТИПЫ И ИСТОЧНИКИ

В данной главе предполагается проанализировать источники неопределенности, сопровождающей все этапы процедуры КОР ВПОО нефтегазовой отрасли, а также выполнить некоторые количественные оценки. С целью минимизации модельной неопределенности будут рассматриваться подходы только отечественных Руководств по КОР (МЧС России и Ростехнадзора). И лишь в отдельных случаях, с целью ликвидации пробелов отечественных нормативно-методических документов, будут даны ссылки на положения зарубежных Руководств по КОР.

### 2.1 Типы неопределенности источников аварийного риска

Как указывалось в первой главе диссертации, при анализе неопределенности аварийного, пожарного, а также экологического риска, принято выделять ее модельный и параметрический типы. Ряд авторов добавляет еще один – терминологический (шире – коммуникативный) тип, обусловленный различным толкованием людьми одних и тех же терминов и понятий. А если учесть, что в современных условиях все расчеты выполняются на ПЭВМ, приближенными методами, в процессе расчетов неизбежно возникает еще один вид неопределенности – вычислительный.

Итак, вкратце изложим классификацию типов неопределенности аварийного риска:

1 *Тип первый – модельный.* При выполнении КОР модельная неопределенность своим возникновением обязана как самой сути моделирования (методу познания Мира), так и альтернативности моделей, используемых для описания аварий. Очевидно, что этот тип неопределенности является исключительно эпистемическим. Можно выделить следующие три его подтипа:

1.1 сценарный, заключающийся в том, что в каждом конкретном случае возможность реализации того или иного сценария аварии далеко не всегда очевидна (выбор определяется квалификацией эксперта);

1.2 концептуальный, обусловленный привлечением тех или иных известных физических, химических и биологических законов для описания и моделирования феноменов, наблюдаемых при возникновении аварии и последующих событий. Концептуальная неопределенность заключается в выборе той или иной физико-математической, биохимической модели, система уравнений которой выражает соотношения между ее параметрами;

1.3 аппроксимационный, обязанный своим наличием принятыми в модели: а) упрощениями (например, заменой реальной сложной формы пламени простым телом – цилиндром или конусом); б) допущениями о постоянстве некоторых параметров задачи; в) линеаризацией зависимостей (отбрасыванием членов высших порядков) и т.д.

2 *Тип второй – параметрический.* Наличие параметрической неопределенности означает, что величина параметров модельных уравнений либо непостоянна в силу изменчивости по объективным причинам (aleatory), либо их значения точно неизвестны (epistemic) из-за скудности доступной информации. Следовательно, приписывание параметрам точечных (скалярных) значений является лишь грубым (нулевым) приближением и включает в себе скрытую неопределенность (в ряде случаев значительную). С учетом свойств параметров, можно выделить следующие три группы параметрической неопределенности:

2.1 природно-эксплуатационная группа параметров, чья неопределенность объективна и обусловлена их изменчивостью;

2.2 модельная группа, параметры которой обладают неопределенностью исключительно эпистемического происхождения;

2.3 параметры смешанного типа, неопределенность которых обусловлена одновременно как объективными, так и эпистемическими обстоятельствами.

3 *Тип третий – терминологический (коммуникативный).* Терминологическая неопределенность вызвана не только нечетким, неоднозначным определением используемых терминов и понятий в Руководствах по КОР, но и различной их трактовкой специалистами. Последнее обусловлено различным менталитетом людей – отличиями базового образования, стандартов и стереотипов профессиональной среды, в которой они живут и работают. Терминологическая неопределенность имеет не только хорошо известный качественный, но и количественный аспект, [54]. По-разному трактуя один и тот же термин (понятие), специалисты вкладывают в него различный смысл, что может повлечь приписывание параметру различных численных значений. В результате расчеты, выполняемые разными специалистами с использованием одних и тех же расчетных моделей, зачастую дают различающиеся результаты.

4 *Тип четвертый – вычислительный.* Лишь аналитические расчеты, сделанные "вручную", не обладают неопределенностью. Любой расчет на ПЭВМ с использованием чисел с плавающей запятой, вынужденно выполняет округление, порождающее вычислительную неопределенность. Еще один источник подобной неопределенности – решение уравнений приближенными численными методами. Совершенно особый тип вычислительной неопределенности присущ интервальному анализу. Если не принять специ-

альных мер противодействия, порождаемая интервальными вычислениями неопределенность быстро становится чрезмерной – настолько, что результат расчета теряет всякий практический смысл.

Ниже в данной главе, при анализе неопределенности каждого этапа процедуры КОР, неоднократно будут приведены примеры всех названных типов неопределенности (кроме вычислительной). Вычислительная неопределенность интервального анализа будет подробно исследована в третьей главе диссертации.

Следует отметить, что количественная оценка модельной неопределенности является отдельной большой задачей. Дело в том, что теоретическими методами может быть выполнена лишь верификация той или иной расчетной методики (модели). Что же касается ее валидации, то решающее значение принадлежит эксперименту, сравнению прогнозируемых и экспериментальных результатов. В рамках действующей естественнонаучной парадигмы только опыт является подлинным критерием истинности, все остальное – схоластика. В завершающей части главы на частном примере будет показано, что масштаб модельной неопределенности при выполнении КОР в некоторых случаях очень значителен.

## **2.2 Неопределенность алгоритма анализа и количественной оценки аварийного риска**

Собственно количественной оценке неопределенности аварийного риска должен предшествовать очень важный этап ее качественного анализа, [40]. Риск-ориентированный подход в области пожарной, а также промышленной безопасности предполагает выполнение большого объема аналитической работы по каждому опасному объекту. В течение нескольких десятков лет разработки и отладки данной методологии в разных странах сформировался достаточно универсальный алгоритм ее выполнения, различающийся в редакции отдельных Руководств по КОР незначительными деталями.

После выполнения этапа качественного анализа опасности следует ключевой этап этого алгоритма – этап КОР (количественной оценки аварийного (пожарного) риска), задачей которого является расчет (оценка) ряда целевых показателей риска, которые на последующем этапе подлежат сравнению с нормативными значениями. Завершает алгоритм этап, на котором обосновываются превентивные меры, позволяющие повысить пожарную, промышленную безопасность рассматриваемого объекта (в случае, если это необходимо).

Количественная оценка аварийного (пожарного) риска – сложная процедура, трудоемкость которой для крупных ВПОО, содержащих большое число технологических бло-

ков, может достигать нескольких тысяч человеко-часов экспертного труда. Проанализируем неопределенность процедуры количественной оценки аварийного (пожарного) риска в трактовке двух ведущих отечественных Руководств по КОР: [61] и [93].

"Методика..." [61] МЧС России. Алгоритм выполнения КОР по версии [61] содержит четыре этапа:

1) *выполнение анализа пожарной опасности объекта*. На данном этапе, обычно выполняемом в рамках предварительного анализа опасности (ПАО), предложено разделить технологическое оборудование опасного объекта на участки, для которых следует сформировать перечень сценариев возникновения пожароопасных ситуаций и их развития. При этом рекомендовано учесть параметры взрывопожарной опасности технологической среды, наличие источников зажигания, виды эксплуатационных нагрузок и т.д.;

2) *определение частоты реализации пожароопасных ситуаций*. Для указанной цели рекомендовано использовать данные:

- об отказах оборудования, используемого на объекте;
- параметрах надежности используемого на объекте оборудования;
- ошибочных действиях работника объекта;
- гидрометеорологической обстановке в районе размещения объекта;
- географических особенностях местности в районе размещения объекта;

3) *построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития*. Дан перечень возможных сценариев развития пожароопасных ситуаций и сопровождающих их поражающих факторов. Чтобы уточнить такой перечень для рассматриваемого объекта, в Приложении № 2 [61] приведен метод построения логических деревьев событий;

4) *оценка последствий воздействия опасных факторов пожара на людей для различных сценариев его развития*. На данном этапе рассчитанные величины поражающих факторов следует сравнить с детерминированными или вероятностными критериями поражения людей.

Анализ неопределенности алгоритма КОР, изложенного в "Методике" [61] показывает, что в качестве показателей (метрик) пожарного риска выбраны индивидуальный и социальный риски – параметры, характеризующие пожарную опасность только для людей. В данном случае [61] отражает подход к обеспечению пожарной безопасности, закрепленный нормативным документом более высокого уровня – федеральным законом

[120]. В рамках подобного подхода материальный и экологический ущерб от аварий, сопровождающихся взрывами и пожарами, игнорируется. Кроме того, социальный риск предложено оценивать точным значением, а не функцией, что противоречит логике и мировому опыту.

Неопределенность метрик риска в версии "Методики..." [61] порождается, в том числе, и тем, что методическое обеспечение, позволяющее выполнить количественные оценки ряда факторов или параметров в "Методике" отсутствует, нет и ссылочных документов. Это касается, например:

- влияния эксплуатационных нагрузок на параметры надежности технологического оборудования,
- учета ошибочных действий персонала;
- учета географических и метеорологических особенностей местоположения объекта;
- метода расчета избыточного давления при взрыве парогазовоздушной смеси в помещении;
- метода расчета дрейфа газопаровоздушного облака (газы и пары тяжелее воздуха) под действием ветра;
- метода расчета параметров сценария boilover – вскипания и выброса горячей жидкости при пожаре в резервуаре.

В перечне поражающих факторов аварии (этап 3) отсутствуют осколки, разлетающиеся при взрыве оборудования.

Кроме того, в перечне задач этапа 4 отсутствует расчет показателей пожарного риска, являющийся основной задачей всего алгоритма. С нашей точки зрения, правильнее было бы выделить выполнение этой задачи в отдельный, завершающий этап КОР.

*Руководство по безопасности [93] Ростехнадзора.* Общий алгоритм анализа опасностей и оценки риска аварий на ОПО изложен в разделе IV и уточнен на схемах Приложений №№ 2 и 3. Собственно КОР является одним из вариантов выполнения третьего этапа данного алгоритма, который, наряду с получением собственно количественных, допускает получение качественных и полуколичественных оценок риска:

- возможности возникновения и развития инцидентов и аварий;
- тяжести последствий и (или) ущербов от возможных инцидентов и аварий;
- опасности аварий и связанных с ними угроз в значениях показателей риска.

При этом количественный метод подразумевает получение численных оценок:

1) частоты возможных сценариев аварии. Для оценки частоты предаварийных и пост-аварийных событий рекомендовано использовать: а) статистические данные по аварийно-

сти; б) справочные данные о надежности технологического оборудования; в) логико-графические методы "Анализ деревьев событий", "Анализ деревьев отказов"; г) имитационное моделирование возникновения аварий на ОПО; д) экспертные суждения;

2) последствий данных сценариев. При оценке последствий и ущерба аварий следует определять размеры возможных воздействий на людей, имущество и (или) окружающую среду с учетом прогнозируемой величины поражающих факторов аварии и критериев поражения людей и технических объектов;

3) показателей риска (составляющих) ОПО, в качестве которых допускается использовать количественные характеристики основных опасностей возникновения, развития и последствий аварий.

Анализируя неопределенности алгоритма КОР по версии [93], можно указать на то, что привлечение качественных и полуколичественных методов не в полной мере соответствует методологии риск-ориентированного подхода, поскольку не позволяет выполнить сравнение полученных оценок с нормативными (допустимыми) значениями риска. Кроме того, определение метода полуколичественной оценки риска аварии в приложении № 1 отсутствует. Упомянутые на рисунке 2-1 "индексы опасности аварии" также не пояснены. Отметим, что неопределенность (эпистемическая) качественных и полуколичественных оценок в силу большего вклада субъективного фактора, очевидно, существенно больше, нежели количественных оценок, поэтому они более уместны на предыдущем этапе алгоритма, этапе анализа опасности.

П. 31 [93] трактует *риск аварии* как оценку угрозы причинения вреда "жизни, здоровью людей, вреда животным, растениям, окружающей среде, безопасности государства, имуществу физических и юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу". При этом в числе *основных* показателей риска аварий (п. 34) перечислены показатели, характеризующие исключительно гуманитарный ущерб (вред жизни и здоровью людей). Именно эти показатели предложено сравнивать с допустимыми значениями на этапе управления риском аварий. *Дополнительные* показатели риска, перечисленные в Приложении № 7, разнородны, имеют разную размерность. Таким образом, четкое определение показателей (метрик) риска, необходимых для оценки полного аварийного ущерба, в [93] отсутствует.

Сравнивая изложение алгоритма КОР в [61] и [93] в целом, можно констатировать лучшую его методическую проработанность в "Руководстве" [93]. Особенным достоинством является наличие пункта 50, регламентирующего структуру отчета о КОР. С точки зрения анализа и количественной оценки неопределенности очень важно требование обязательного представления в отчете:

- описания используемых методов анализа, моделей аварийных процессов и обоснования их применения, принятых допущений и ограничений;
- исходных данные и их источников;
- перечня используемых источников информации;
- анализа неопределенностей результатов оценки риска аварий.

К сожалению, каких-либо практических рекомендаций о том, как его осуществлять, "Руководство" не дает. Добавим, что более содержательными были бы результаты количественной оценки неопределенности (КОН) полученных метрик риска. Еще одним достоинством является наличие в Руководстве [93] приложения № 1 (гlossария), позволяющего уменьшить терминологическую неопределенность.

Анализ вышеизложенного позволяет выделить пять этапов процедуры КОР, последовательное выполнение которых необходимо для решения ее основной задачи:

- этап № 1 – оценка параметров (вероятности и масштаба) вариантов головного события (ГС) аварии (взрыва/пожара);
- этап № 2 – определение перечня возможных сценариев развития аварии (взрыва/пожара) и оценка их условных вероятностей;
- этап № 3 – оценка величины поражающих факторов, сопровождающих выбранные сценарии аварии (взрыва/пожара);
- этап № 4 – оценка условной вероятности нанесения выбранным объектам-мишеням, оказавшимся в зоне поражения аварии (взрыва/пожара), заданных видов ущерба в натуральном выражении;
- этап № 5 – монетизация всех видов ущерба и расчет метрик аварийного (пожарного) риска.

Далее проанализируем источники неопределенностей, сопутствующие каждому из перечисленных этапов процедуры КОР.

## **2.3 Неопределенность этапа оценки параметров головного события аварии**

### **2.3.1 Методы оценки вероятности вариантов головного события аварии**

Как известно, к настоящему времени каноническое определение риска отсутствует. При этом его толкование общего типа "риск – сочетание вероятности события и его последствий" из ГОСТ Р 51901.1-2002 [26], по-видимому, устраивает всех специалистов. Определения показателей риска, используемых в области пожарной и промышленной безопасности, полностью соответствует этой общей его трактовке. Не являются исклю-

чением социальный и материальный риски, их отличает только то, что величине вероятности и ущерба аварии (взрыва/пожара) в них не присваиваются конкретные численные значения, они связываются функциональной зависимостью.

Таким образом, неопределенность оценки любого показателя риска складывается из неопределенности обоих его компонентов. При этом, как показывает опыт, преобладающий вклад вносит именно неопределенность оценки вероятности событий.

Рассмотрим, как Руководства по КОР рекомендуют оценивать вероятность вариантов головного события. Неопределенность (терминологическая) заключается уже в самом понятии вероятности события, которое в методологии риска до сих пор строго не определено. Как известно, существует несколько трактовок вероятности:

- аксиоматическая (множественно-теоретическая), предложенная А.Н.Колмогоровым;
- частотная, восходящая к теории игр (Паскаль);
- субъективная.

Применение первых двух ее трактовок для реальных технологических объектов наталкивается на серьезное препятствие, связанное с тем обстоятельством, что их свойства не обладают статистической устойчивостью, а сами они не образуют генеральных совокупностей. В этой связи использование математического аппарата классической теории вероятности для большей части подобных объектов не является обоснованным.

При этом для отдельных элементов массовых серий подходы теории надежности, опирающиеся на вероятностное описание таких событий как отказ, обоснованны, в том числе теоретически. Для прогнозирования параметров надежности технических элементов более корректными, чем классическое вероятностное описание, являются современные методы интервальной или нечеткой теории вероятности, учитывающие реальный разброс условий их эксплуатации.

Трудность точной оценки вероятности инициирующего аварии события обусловлена большим числом вызывающих его труднопрогнозируемых факторов, часть из которых взаимосвязана (синергетический эффект). В этой связи метод анализа "деревьев отказов", основанный на линейной логике, не вполне адекватен для прогнозирования аварий сложных технических систем. Известно, что неоднократно фиксировались аварии на крупных промышленных объектах, не предсказанные методами теории надежности, [56]. При этом для оценки вероятности инициирующего события (отказа) простых технологических объектов использование метода "деревьев отказов" следует признать оправданным.

Анализ имеющейся методической базы анализа и оценки риска в области пожарной и промышленной безопасности показывает, что в ней реализованы следующие подходы к оценке вероятности событий аварии:

1) иницирующего события – приводятся значения:

- либо вероятности ряда стандартизованных исходных событий, таких как утечка опасного вещества (малая, средняя, крупная), отказ на требование элементов безопасности;
- либо значения интенсивности отказов технических элементов, получаемые в заводских лабораториях при проведении специальных испытаний, имитирующих различные условия их эксплуатации. Интенсивность отказов позволяет прогнозировать вероятность отказа изделия с учетом величины его наработки в течение года. Она принимается постоянной, хотя могут быть учтены и поправки на старение. В относительно редких случаях (например, для радиоэлектронных компонентов) сведения об интенсивности отказов приводятся дифференцированно по их маркам;

2) событий дальнейшего развития аварии – даются значения условной вероятности:

- либо реализации тех или иных сценариев ее развития;
- либо наличия на прилегающей территории источников зажигания с подходящими параметрами.

Отметим, что подавляющая часть величин параметров в Руководствах по КОР представлена точечными числами, интервальные значения редки.

В качестве примера в таблицах 2.1 – 2.3 представлены данные о вероятности отказа (разгерметизации) различного технологического оборудования, заимствованные из отечественных и зарубежных литературных источников.

Таблица 2.1 – *Справочные данные о надежности емкостного оборудования*

№ п/п	Вид оборудования	Тип разгерметизации	Частота, год <sup>-1</sup>	Источник данных
<b>1. Отечественные источники данных</b>				
1.1	Одностенный резервуар	полное разрушение	$10^{-5}$	[93]
		продолжительный выброс через отверстие диаметром 10 мм	$10^{-4}$	
1.2	Резервуары для хранения ЛВЖ и горючих жидкостей, работающие при давлении, близком к атмосферному	полное разрушение	$5.0 \cdot 10^{-6} *$	[61]
		отверстие 25 мм	$8.8 \cdot 10^{-5} *$	
1.3	Резервуары для хранения ЛВЖ и горючих жидкостей объемом менее 450 м <sup>3</sup> , работающие при давлении, близком к атмосферному	полное разрушение	$8.0 \cdot 10^{-6} *$	[74]
		отверстие диаметром 25 мм	$5.0 \cdot 10^{-4} *$	
1.4	Резервуар гидравлический	не указан	$(0.7 \div 2) \cdot 10^{-3} **$	[16]

Окончание таблицы 2.1

№ п/п	Вид оборудования	Тип разгерметизации	Частота, год <sup>-1</sup>	Источник данных
1.5	Резервуар для хранения нефтепродуктов с вертикальными стенками	не указан	$1.6 \cdot 10^{-3}$	[55]
1.6	Автомобильная, железнодорожная цистерна при атмосферном давлении	мгновенный выброс всего содержимого (полное разрушение)	$1 \cdot 10^{-5}$	[93]
		продолжительный выброс через отверстие, соответствующее размеру наибольшего соединения	$5 \cdot 10^{-7}$	
<b>2. Зарубежные источники данных</b>				
2.1	Большие резервуары нормального давления	полное разрушение	$5 \cdot 10^{-6}$	[180]
		большая *** утечка	$1 \cdot 10^{-4}$	
		малая *** утечка	$2.5 \cdot 10^{-3}$	
2.2	Резервуары нормального давления со стационарной крышей	полное разрушение	$(0.55, 5.5) \cdot 10^{-6}$	[206]
		утечка (размер не указан)	$(0.51, 5.1) \cdot 10^{-3}$	
2.3	Резервуар нормального давления	полное квазимгновенное разрушение	$1 \cdot 10^{-8}$	[150]
		продолжительное истечение через отверстие 10 мм	$1 \cdot 10^{-4}$	
2.4	Резервуар нормального давления	полное квазимгновенное разрушение	$5 \cdot 10^{-6}$	[194]
<p><i>Примечания:</i></p> <p>* судя по библиографическому списку Пособия ВНИИПО (2012) [74] (а также численным значениям), сведения о частоте отказов оборудования взяты из постоянно обновляемой базы данных Британского агентства Health and Safety Executive. Следовательно, эти данные логичнее отнести к зарубежным источникам;</p> <p>** пересчитано к размерности 1/год при допущении, что резервуар эксплуатируется круглогодично, т.е. 8760 ч/год;</p> <p>*** обращает на себя внимание терминологический аспект неопределенности (ambiguity) – количественные критерии отличия большого от малого отсутствуют</p>				

Параметрическая неопределенность в данном случае представлена разбросом численных значений, опубликованных в литературе. В следующих двух таблицах приведем доступные нам сведения о надежности линейного и насосного оборудования.

Таблица 2.2 – *Справочные данные о надежности линейного оборудования*

№ п/п	Вид оборудования	Тип разгерметизации	Частота (интенсивность)	Источник данных
1.1	Трубопроводы диаметром менее 75 мм	на полное сечение	$1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	[93]
		отверстие 10% от номинального диаметра трубы, но не больше 50 мм	$5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	

Окончание таблицы 2.2

№ п/п	Вид оборудования	Тип разгерметизации	Частота (интенсивность)	Источник данных
1.1	Трубопроводы диаметром от 75 до 150 мм	на полное сечение	$3 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	[93]
		отверстие 10% от номинального диаметра трубы, но не больше 50 мм	$2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	
1.2	Трубопроводы	не указан	$(0.25, 4.85) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1} *$	[16]
1.3	Трубопроводы диаметром 50 мм	отверстие 12.5 мм отверстие 25 мм на полное сечение	$5.7 \cdot 10^{-6} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $2.4 \cdot 10^{-6} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $1.4 \cdot 10^{-6} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	[61], [74]
	Трубопроводы диаметром 100 мм	отверстие 12.5 мм отверстие 25 мм отверстие 50 мм на полное сечение	$2.8 \cdot 10^{-6} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $1.2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $4.7 \cdot 10^{-7} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $2.4 \cdot 10^{-7} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	
	Трубопроводы диаметром 150 мм	отверстие 12.5 мм отверстие 25 мм отверстие 50 мм отверстие 100 мм на полное сечение	$1.9 \cdot 10^{-6} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $7.9 \cdot 10^{-7} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $3.1 \cdot 10^{-7} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $1.3 \cdot 10^{-7} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ $2.5 \cdot 10^{-8} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	
2.	Устройство жесткого типа для слива/налива железнодорожной/автомобильной цистерны	полное разрушение	$3 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$	[93]
		отверстие 10% от номинального диаметра трубы, но не больше 50 мм	$3 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$	
<i>Примечание * без учета длины участка технологического трубопровода. По-видимому, следует читать как <math>[0.25, 4.85] \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}</math></i>				

Таблица 2.3 – Справочные данные о надежности насосного оборудования

№ п/п	Вид оборудования	Тип разгерметизации	Частота (интенсивность)	Источник данных
1.	Насосы	диаметр отверстия, равный диаметру наибольшего трубопровода	$1 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$	[93]
		диаметр отверстия равен 10% диаметра наибольшего трубопровода, но не более 50 мм	$5 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$	
2.	Насосы в корпусе из ковanej стали	диаметр отверстия, равный диаметру наибольшего трубопровода	$5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$	[93]
		диаметр отверстия равен 10% диаметра наибольшего трубопровода, но не более 50 мм	$2.5 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$	
3.	Насосы (центробежные)	диаметр отверстия 5 мм	$4.3 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$	[61], [74]
		диаметр отверстия 12.5 мм	$6.1 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$	
		диаметр отверстия 25 мм	$5.1 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$	

Окончание таблицы 2.3

№ п/п	Вид оборудования	Тип разгерметизации	Частота (интенсивность)	Источник данных
3.	Насосы (центробежные)	диаметр отверстия 50 мм	$2.0 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$	[61], [74]
		диаметр отверстия равен диаметру подводящего /отводящего трубопровода	$1.0 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$	
4.	Насосы с машинным приводом	не указан	$[1.12, 31.3] \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	[16]

Для целей КОН выполним сравнительных анализ данных только из отечественных источников, поскольку зарубежные данные в силу объективных различий технологического оборудования и поведенческих стереотипов персонала в России и странах западной Европы и северной Америки в рассматриваемой объектной области не могут быть рекомендованы к использованию.

В отношении надежности емкостного оборудования, используемого для хранения и перевозки нефтепродуктов, следует учесть одно важное обстоятельство, обычно игнорируемое, а именно их тип – горизонтальный (РГС) или вертикальный (РВС), [50]. Если резервуары типа РГС изготавливаются в относительно стандартных заводских условиях, то крупнотоннажные резервуары с вертикальными стенками монтируются под открытым небом, "на месте", методом полистовой сборки с применением ручной электрогазосварки. Неудивительно, что отечественные данные о надежности РВС имеют существенный разброс. Сравнение с показателями надежности аналогичных резервуаров иностранного происхождения демонстрирует еще большее различие (несколько порядков величины), что вполне закономерно.

В итоге, с учетом данных таблиц 2.1 – 2.3 принимаем следующие интервальные оценки вероятности отказа емкостного оборудования:

1) вероятность полной разгерметизации:

а) резервуара РВС-200  $P_{200.п} \in [1, 2] \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;

б) резервуара РГС-75  $P_{75.п} \in [1, 2] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

в) ж/д- автоцистерны  $P_{ц.п} \in [0.75, 1.5] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

2) вероятность частичной разгерметизации (утечки через отверстие  $10 \div 25$  мм):

а) резервуара РВС-200  $P_{200.у} \in [2, 5] \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ ;

б) резервуара РГС-75  $P_{75.у} \in [1, 2] \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ ;

в) ж/д- автоцистерны  $P_{ц.у} \in [3, 7] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ .

Для вероятности отказа линейного оборудования (трубопроводы) принимаем следующие интервальные оценки:

1) вероятности полной разгерметизации (гильотинного типа):

- а) участка трубопровода диаметром 150 мм  $P_{тр.п} \in [0.5, 3] \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ;
- б) сливо-наливного устройства жесткого типа  $P_{сн.п} \in [2, 4] \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ ;
- 2) вероятности утечки через отверстие диаметром 10% диаметра трубы:
- а) участка трубопровода диаметром 150 мм  $P_{тр.у} \in [2, 3] \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ;
- б) сливо-наливного устройства жесткого типа  $P_{сн.у} \in [2, 4] \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ .

В качестве интервальных оценок вероятности утечки флюида через отверстие в насосном оборудовании принимаем значения:

- а) для отверстия диаметром 50 мм  $P_{н.п} \in [1, 2] \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ ;
- б) — " — " — " — " — " — " — 10 мм  $P_{н.у} \in [5, 6] \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ .

### 2.3.2 Методы оценки параметров головного события аварии, характеризующих ее масштаб

В результате разгерметизации (полной или частичной) оборудования, содержащего горючий флюид (ЛВЖ, сжатый газ или СУГ), произойдет его аварийный выброс в окружающее пространство. КОР предполагает оценку таких параметров ГС, как массовый расход, общее количество выброшенного вещества, площадь формирующегося пролива, либо объем газо-паровоздушного облака (облака топливовоздушной смеси, ТВС). Рассмотрим методические подходы Руководств по КОР к оценке этих параметров.

*Авария с выбросом ЛВЖ.* Согласно классификации Руководства по безопасности [89] авария на участке трубопровода относится к сценариям типа 3 (полное разрушение) и типа 4 (частичная разгерметизация). Рекомендуемые методы расчета массовой скорости истечения жидкого флюида  $G_{выб}$ , кг/с, разнятся для ситуаций:

а) большой (площадь отверстия превышает 20% площади сечения трубы) утечки из резервуара через аварийный участок самотечного трубопровода, для расчета величины которой предложено уравнение:

$$G_{выб} = 0.6 \cdot S \cdot \text{sign}(Q_n^*) \sqrt{2 \cdot H_{ж} \cdot g \cdot \rho_{ж}^2 + 2 \cdot \rho_{ж} \cdot (P_{рез} - P_n(T)) + \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta H_b^2 \cdot \rho_n^2(T)}{c_p \cdot T_b}}, \quad (2.1)$$

где  $Q_n^*$  – масса жидкой фазы флюида в резервуаре выше уровня аварийного отверстия, кг;

$H_{ж}$  – гидростатический уровень жидкости в резервуаре, м;

$P_{рез}$  – полное давление в резервуаре, Па;

$P_n(T)$  – давление насыщенного пара при температуре  $T$ , Па; которое предложено рас-

считывать по соотношению (получаемому интегрированием уравнения Клайперона-Клаузиуса, [101]):

$$P_n(T) = P_0 \cdot \exp \left\{ \frac{\Delta H_b \cdot \mu}{\hat{R}} \cdot \left( \frac{1}{T_b} - \frac{1}{T} \right) \right\}, \quad (2.2)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_n(T)$  – плотность пара при температуре  $T$ , кг/м<sup>3</sup>;

$T_b$  – температура кипения вещества при атмосферном давлении, К;

$\Delta H_b$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

$c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·К;

$K$  – функция, достаточно сложным образом зависящая от длины аварийного участка трубопровода.

К сожалению, как уже было отмечено, никаких физических обоснований рекомендуемых формул в [89] нет. Анализ (2.1) показывает, что это модифицированное классическое уравнение Бернулли, в котором коэффициент истечения  $\sigma$  принят равным 0.6 независимо от вида отверстия;

б) большой (площадь отверстия превышает 20 % площади сечения трубы) утечки из аварийного участка напорного трубопровода (нагруженного насосом), величину  $G_{выб}$ , кг/с, логично предложено приравнять производительности насоса  $q_{насос}$ :

$$G_{выб} = q_{насос}; \quad (2.3)$$

в) остальных случаев – рекомендовано уравнение Бернулли:

$$G_{выб} = 0.6 \cdot \rho_{ж} \cdot \sqrt{2 \cdot H_{ж} \cdot g + 2 \cdot \frac{(P_{рез} - P_0)}{\rho_{ж}}}. \quad (2.4)$$

где  $P_0$  – атмосферное давление, Па.

Сценарная неопределенность при частичном или полной разгерметизацией резервуара с горючей жидкостью обусловлена учетом/неучетом перелива вытекающей жидкости через обвалование. Перетекание жидкости через обвалование – как при полном квазимгновенном разрушении резервуара, так и при его частичной разгерметизации, по видимому, впервые было смоделировано в работе Гринспена и Янга (Greenspan & Young) [168], численное решение в одномерной постановке получено в работе Ю.Н.Шебеко с соавторами [131].

К сожалению, условие (ПЗ.4) [61] возможности перелива жидкости через обвалование при частичной разгерметизации резервуара:

$$h_{\text{hol}} \geq h_{\text{об}} + \frac{L_{\text{об}}}{\sigma}, \quad (2.5)$$

где  $h_{\text{hol}}$  – высота расположения отверстия над земной поверхностью, м;

$h_{\text{об}}$  – высота обвалования, м;

$L_{\text{об}}$  – расстояние от стенки резервуара до гребня обвалования, м;

определяется, в том числе, величиной коэффициента истечения  $\sigma$ , которая в [61] не задана. Для оценки доли жидкости, перелившейся через обвалование при полной квазимгновенной разгерметизации РВС, можно воспользоваться графиком рисунка ПЗ.2 [61].

Что касается неограниченных проливов, согласно [89] в качестве усредненной глубины пролива принято универсальное значение 0.05 м, не дифференцированное по типу подстилающей поверхности (хотя в примечании сказано, что при должном обосновании эта величина может быть изменена). Для целей сравнения можно указать на то, что зарубежные Руководства по КОР приводят более дифференцированные значения глубины неограниченного аварийного пролива:

Таблица 2.4 – *Средняя глубина пролива на неограниченную площадку, [173]*

Режим растекания	Средняя глубина пролива, м
Плоский песчаный или каменистый грунт, бетон, городская местность	0.005
Обычный песчаный грунт, гравий, железнодорожная станция	0.01
Неровный песчаный грунт, сельскохозяйственные угодья, луговина	0.02
Неровная поверхность	0.025

В случае истечения ЛВЖ (бензина) из малого отверстия в стенке трубопровода, в общем случае величина массового расхода  $G_{\text{выб}}$ , кг/с, может быть найдена как решение системы шести нелинейных уравнений (6-1) Приложения 6 [91]. В некоторых частных случаях, с учетом особенностей рассматриваемой задачи, данная система уравнений может быть упрощена. Так, приняв равенство всех высотных отметок  $h_j$  трубопровода и учитывая наличие местных сопротивлений, преобразуем ее к виду:

$$P_{\text{н}} - P_{\text{разр}} = \left( \lambda_{\text{пр}} \cdot \frac{L_1}{d} + \lambda_{\text{м.до}} \right) \cdot \frac{u_{\text{до}}^2 \cdot \rho_{\text{ж}}}{2}, \quad (2.6a)$$

$$P_{\text{разр}} - P_{\text{к}} = \left( \lambda_{\text{пр}} \cdot \frac{L_2}{d} + \lambda_{\text{м.после}} \right) \cdot \frac{u_{\text{после}}^2 \cdot \rho_{\text{ж}}}{2}, \quad (2.6б)$$

$$G_{\text{выб}} = 0.6 \cdot S_{\text{отв}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot (P_{\text{разр}} - P_{\text{а}})}, \quad (2.6\text{в})$$

$$G_{\text{выб}} = G_{\text{до}} - G_{\text{после}}, \quad (2.6\text{г})$$

$$G_{\text{до}} = -\frac{\pi \cdot d^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot u_{\text{до}}}{4}, \quad (2.6\text{д})$$

$$G_{\text{после}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot u_{\text{после}}}{4}, \quad (2.6\text{е})$$

где  $P_{\text{разр}}$  – давление в трубе в месте разрушения, Па;

$d$  – диаметр трубопровода, м;

$u_{\text{до}}$  – скорость движения бензина в трубе до места разрушения, м/с;

$u_{\text{после}}$  – скорость движения бензина в трубе после места разрушения, м/с.

Зависимость коэффициента гидравлических потерь  $\lambda_{\text{пр}}(u)$  на прямых участках трубопровода диаметром  $d$ , м, с шероховатостью  $\Delta_s$ , м, от скорости потока, для турбулентных потоков с числом Рейнольдса  $Re > 4000$  может быть задана формулой Альтшуля

$$\lambda_{\text{пр}}(u) = 0.11 \cdot \left( \frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}. \quad (2.7)$$

*Авария с выбросом сжатого газа.* Руководства по КОР различают два режима истечения сжатого газа через аварийное отверстие в стенке (резервуара или газопровода):

а) при докритических давлениях:  $P_{\text{рез1}} < P_0 \cdot \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$

$$G_{\text{выб1}} = A_{\text{hol}} \cdot \sigma \cdot \left[ P_{\text{рез1}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \right) \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{рез1}}} \right)^{2/\gamma} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{P_0}{P_{\text{рез1}}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} \right]^{1/2}; \quad (2.8)$$

б) сверхкритических давлениях  $P_{\text{рез2}} > P_0 \cdot \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$  :

$$G_{\text{выб2}} = A_{\text{hol}} \cdot \sigma \cdot \left[ P_{\text{рез2}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot \gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2}, \quad (2.9)$$

где  $q = A_{\text{hol}}$  – площадь отверстия, м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – коэффициент истечения (при отсутствии данных допускается принимать равным 0.8);

$\rho_{\text{г}}$  – плотность газа при давлении  $P_{\text{рез}}$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – коэффициент Пуассона газа.

Выражая плотность газа через уравнение идеального газа и деля обе части (2.8) на плотность, получим соотношение для вычисления объемного расхода газа/пара  $W_0$ , м<sup>3</sup>/с, в докритическом режиме истечения:

$$W_{01} = \sigma \cdot \frac{\pi \cdot d_j^2}{4} \cdot \left[ \frac{\hat{R} \cdot T_{\text{рез1}}}{\mu} \cdot \left( \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \right) \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{рез1}}} \right)^{2/\gamma} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{P_0}{P_{\text{рез1}}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} \right]^{1/2}. \quad (2.10)$$

Параметры головного события аварии, заключающейся в разгерметизации участка газопровода с компримированным газом, могут быть оценены с помощью модели Белла, предложенной Руководством по безопасности [92]. Массовый расход  $G_{\text{выб}}(t)$ , кг/с и масса  $M(t)$ , кг, природного газа, вытекшего из отверстия, в заданный момент времени  $t$  после образования отверстия:

$$G_{\text{выб}}(t) = \frac{\Gamma \cdot G_0}{1 + \eta_M} \cdot \left[ \exp\left(-\frac{t}{\eta_M^2 \cdot \varepsilon}\right) + \eta_M \cdot \exp\left(-\frac{t}{\varepsilon}\right) \right], \quad (2.11)$$

где  $\Gamma$  – фактор инерциальной задержки ( $\Gamma \approx 0.5$ );

$G_0$  – начальный (в момент разрыва) массовый расход газа, кг/с. В адиабатическом приближении

$$G_0 = P_1 \cdot A_s \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{R \cdot Z_{z_{\text{кр}}} \cdot T_1}} \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}, \quad (2.12)$$

где  $A_s$  – площадь поперечного сечения разрыва, м<sup>2</sup>;

$P_1$  – давление газа в трубопроводе, Па;

$T_1$  – температура газа в трубопроводе, К;

$R$  – удельная газовая постоянная, Дж/кг·К;

$Z_{z_{\text{кр}}}$  – коэффициент сжимаемости природного газа в термодинамическом состоянии  $T_{\text{кр}}$ ,  $P_{\text{кр}}$ . Согласно СТО Газпром 3.3-2-024-2011 [109] сжимаемость природного газа в трубопроводе может быть оценена по соотношению

$$Z_z = 1 - [(10.2 \cdot P_1 - 6) \cdot (0.00345 \cdot \Delta - 0.000446) + 0.015] \cdot [1.3 - 0.0144 \cdot (T_1 - 283.2)] \quad (2.13)$$

где размерности  $[P_1] = \text{МПа}$  (абсолютное давление газа);  $[T_1] = \text{К}$ ;

$\Delta$  – поправочный коэффициент:

$$\Delta = \frac{P_{\text{гн}}}{1.2044}, \quad (2.14)$$

$\rho_{\text{гн}}$  – плотность газа в нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta_m$  – коэффициент сохранения массы:

$$\eta_m = \frac{M_0}{\varepsilon \cdot \Gamma \cdot G_0}, \quad (2.15)$$

$M_0$  – масса газа, способного вытечь из изолированной секции трубопровода, кг:

$$M_0 = \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot L_{\text{тр}} \cdot P_1}{4 \cdot R \cdot Z_{Z_1} \cdot T_1}, \quad (2.16)$$

$L_{\text{тр}}$  – длина отсеченного участка трубопровода, м;

$Z_{Z_1}$  – коэффициент сжимаемости газа в термодинамическом состоянии  $P_1, T_1$ ;

$\varepsilon$  – постоянная времени, с, в изотермическом приближении:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot L_{\text{тр}}}{3 \cdot u_{\text{зв}}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot \lambda_{\text{тр}} \cdot L_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}}}, \quad (2.17)$$

$u_{\text{зв}}$  – скорость звука в газе в трубопроводе до разрыва, м/с:

$$u_{\text{зв}} = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot Z_{Z_1} \cdot T_1}, \quad (2.18)$$

$\lambda_{\text{тр}}$  – коэффициент трения газа о стенки трубы.

Из (2.12) следует, что начальная скорость истечения газа из аварийного отверстия в трубопроводе, м/с:

$$u_0 = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot Z_{Z_{\text{кр}}} \cdot T_1 \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \quad (2.19)$$

а скорость течения газа в трубе  $u_{\text{тр}} = u_{\text{шт}} \pm \Delta u$ ,

$u_{\text{шт}}$  – скорость течения газа в штатном режиме эксплуатации газопровода, м/с;

$$\Delta u = \frac{A_s}{A_{\text{тр}}} \cdot u_0. \quad (2.20)$$

*Авария с выбросом СУГ.* При истечении паровой фазы СУГ из аварийного отверстия величина массовой скорости истечения паровой фазы  $G_v$ , кг/с, может быть найдена по формуле (ПЗ.15) [61]:

$$G_v = \sigma \cdot A_s \cdot \sqrt{\frac{P_v \cdot \mu}{\hat{R} \cdot T_{\text{кр}}} \cdot P_{\text{кр}} \cdot (0.167 \cdot P_r^5 + 0.534 \cdot P_r^{1.95})}, \quad (2.21)$$

где  $\sigma$  – коэффициент истечения;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;

$\hat{R}$  – универсальная газовая постоянная, равная 8.31 Дж/(К·моль);

$P_r = P_v/P_{кр}$  – безразмерное давление сжиженного газа в резервуаре;

$P_v$  – давление сжиженного газа в резервуаре, Па.

Массовую скорость истечения двухфазной струи СУГ,  $G_l$ , кг/с, можно оценить по соотношению (ПЗ.16) [61]:

$$G_l = G_v \cdot \frac{\sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_v} \cdot P_r}}{1.22 \cdot T_r^{3/2}}, \quad (2.22)$$

где  $\rho_l$  – плотность жидкой фазы СУГ, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_v$  – плотность паровой фазы СУГ, кг/м<sup>3</sup>;

$T_r = T/T_{кр}$  – безразмерная температура СУГ.

В ситуации квазимгновенного разрушения сосуда – мгновенном выбросе и контакте жидкой фазы СУГ с подстилающей поверхностью, температура которой превышает температуру кипения при атмосферном давлении, ее доля  $\delta$  мгновенно испарится, образуя парокпельную смесь, оставшаяся часть сформирует пролив. Согласно расчетным соотношениям раздела 27 Приложения 3 [61] доля:

$$\delta = 1 - \exp\left\{-\frac{C_l \cdot (T_a - T_b)}{L_b}\right\}, \quad (2.23)$$

где  $C_l$  – удельная теплоемкость жидкой фазы СУГ, Дж/кг·К;

$T_a$  – температура окружающего воздуха, К;

$T_b$  – температура кипения СУГ при атмосферном давлении, К;

$L_b$  – удельная теплота парообразования СУГ, Дж/кг.

### 2.3.3 Источники неопределенности, сопутствующей оценке параметров головного события аварии

Выполненный нами анализ позволил выявить на первом этапе процедуры КОР следующие источники неопределенности различных типов:

1 *терминологического типа*:

- в Руководстве по безопасности [92] не пояснено толкование терминов "критическое" давление и "критическая" температура, что создает некоторую терминологическую неопределенность. Дело в том, что существуют понятия: а) термодинамических критических температуры и давления (выше которых становится невозможно равновесие фаз ве-

щества); и б) "гидравлического" критического давления при истечении газа из отверстия (с критической скоростью, равной скорости звука), значения которых различаются;

### *2 модельного типа:*

#### 2.1 сценарной:

- наличие альтернативности, заключающейся в учете/неучете перелива жидкости через обвалование при разгерметизации резервуара с ЛВЖ, что влечет за собой существенное различие оценок площади пролива;

#### 2.2 концептуальной:

- уравнение (2.2) для расчета давления насыщенного пара многокомпонентных технических смесей (типа бензина) не может быть использовано, поскольку для них отсутствуют точные значения параметров "температура кипения"  $T_b$  и "удельная теплота парообразования"  $\Delta H_b$ . Для оценки давления паров подобных веществ предпочтительнее воспользоваться корреляцией Антуана, коэффициенты которой для широкой номенклатуры веществ доступны в справочной литературе, например, [75];

- неучет типа резервуара (горизонтальный или вертикальный) при задании параметров его надежности;

#### 2.3 аппроксимационной: уравнение (2.1) вызывает ряд вопросов:

- непонятно, почему из полного избыточного давления в резервуаре вычитается парциальное давление паров самой жидкости. По-видимому, это опечатка, по аналогии с формулой (48) [89] для жидкой фазы в соотношении (2.1) из полного давления внутри резервуара  $P_{рез}$  вместо  $P_n(T)$  следует вычитать атмосферное давление  $P_0$ . Давление насыщенных паров логично учитывать при истечении двухфазного потока вскипающей жидкости, как это сделано в модели [173];

- совершенно неясен физический смысл третьего слагаемого под радикалом. Наличие в нем такого параметра, как удельная теплота испарения, наталкивает на мысль, что этот член связан со вскипанием перегретых жидкостей и должен учитываться лишь для двухфазных течений, в случае истечения ЛВЖ он равен нулю;

### *3 параметрического типа:*

- величина параметров, характеризующих надежность оборудования. Очевидно, что эксплуатационные свойства любого изделия, технического элемента определяются совокупностью, [40]: а) нескольких определяющих факторов детерминистического типа; б) множеством существенно более слабых факторов случайного типа. В результате каждое изделие обладает набором: а) "родовых" качеств, собственно и позволяющих объединить эти объекты в одну категорию; б) индивидуальных особенностей. Кроме того, большая часть параметров надежности определяется в процессе измерений, всегда сопровождаемых измерительной неопределенностью стохастической природы (типа А, [171]).

Указанные обстоятельства обуславливают тот факт, что результаты определения параметров надежности изделий всегда обладают некоторым разбросом. Полное множество изделий данного типа образует генеральную совокупность, а заводские испытания определенного их количества дают выборочную статистику, характеризуемую выборочным средним, дисперсией и другими статистическими параметрами, [40]. Вообще говоря, генеральные совокупности изделий одного типа, даже непосредственно сразу после их изготовления на различных заводах, будут обладать различающимися параметрами распределения вероятностей (в теории вероятностей разработаны хорошо известные методы проверки статистических гипотез о равенстве средних и дисперсий). В последующем различия в условиях эксплуатации (нагрузочные режимы, климатические условия, техническое обслуживание и др.) только увеличат этот разброс свойств изделий, в т.ч. определяющих их надежность. С учетом сказанного не вызывает удивления тот факт, что опубликованные данные о параметрах надежности (например, частоте отказов) технологического оборудования часто различаются очень сильно;

- разброс опубликованных данных о величине коэффициента истечения жидкости из аварийного отверстия;
- разброс имеющихся данных о глубине слоя неограниченного пролива ЛВЖ.

## **2.4 Неопределенность определения перечня сценариев аварий и оценки их условной вероятности**

### **2.4.1 Описание подходов к оценке условной вероятности сценариев**

Руководства по КОР обычно приводят наиболее полный перечень сценариев аварии, которые теоретически могут быть реализованы на ВПОО. Однако в конкретном случае, для каждого варианта их головного события, перечень возможных сценариев ее развития уже, и его правильное задание определяется компетентностью эксперта (в особенной степени это относится к оценке возможности эскалации аварии по механизму домино).

Для оценки условной вероятности реализации того или иного сценария развития аварии Руководства по КОР предлагают два подхода:

- 1) основанный на статистике уже произошедших аварий. В рамках данного подхода рекомендуются численные (обычно – точечные) значения условной вероятности того или иного сценария;
- 2) более дифференцированный подход, учитывающий наличие в области топливно-воздушной смеси (ТВС) источников зажигания.

В качестве примеров использования первого подхода рассмотрим таблицы 2.5, 2.6 и 2.7. Отметим, что Методика МЧС РФ [61] при пользовании таблицей 2.5 дает общую рекомендацию "принимать во внимание свойства поступающих в окружающее простран-

во горючих веществ, условные вероятности реализации различных метеорологических условий (температуры окружающей среды, скорости и направления ветра и т.д.), наличие и условные вероятности эффективного срабатывания систем противоаварийной и противопожарной защиты и т.д." Таким образом, сообщаемые в данной таблице точечные значения условных вероятностей на самом деле являются интервалами.

Таблица 2.5 – *Условная вероятность мгновенного воспламенения выброса горючего вещества и воспламенения с задержкой, [61]*

Массовый расход истечения, кг/с		Условная вероятность мгновенного воспламенения			Условная вероятность последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения			Условная вероятность сгорания с избыточным давлением при образовании горючего облака и его воспламенении		
Диапазон	Номинальное среднее значение	Газ	двух-фазная смесь	жидкость	газ	двух-фазная смесь	жидкость	газ	двух-фазная смесь	жидкость
Малый (<1)	0.5	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.080	0.080	0.050
Средний (1 - 50)	10	0.035	0.035	0.015	0.036	0.036	0.015	0.240	0.240	0.050
Большой (>50)	100	0.150	0.150	0.040	0.176	0.176	0.042	0.600	0.600	0.050
Полный разрыв	не определено	0.200	0.200	0.050	0.240	0.240	0.061	0.600	0.600	0.100

Таблица 2.6 – *Статистические данные об условных вероятностях различных сценариев развития аварии с выбросом СУГ, [24]*

Сценарий аварии	Условная вероятность
Факел	0.0574
Сгорание облака (пожар-вспышка)	0.1689
Горение пролива	0.0287
Сгорание с развитием избыточного давления	0.0119
Огненный шар	0.7039
Без горения	0.0292

Таблица 2.7 – *Условные вероятности мгновенного воспламенения при аварийных выбросах горючих жидкостей и газов, [91], [92]*

Аварийная ситуация	Горючее вещество	Условная вероятность	
Разгерметизация участка трубопровода	газ	0.2	
	жидкость	0.05	
Разгерметизация цистерны при сливо-наливных операциях:	жидкость	• частичная	0.1
		• полная автоцистерна	0.4
		• полная ж/д цистерна	0.8

Второй подход к оценке условных вероятностей различных сценариев аварий реализован в Руководствах по безопасности [91], [92]. В них даны расчетные соотношения, позволяющие оценить общую вероятность зажигания облака ТВС, но не дающие возможность прогнозировать, какой именно сценарий аварии (взрыв, пожар-вспышка) будет реализован.

Условную вероятность воспламенения  $P_b(\tau)$  аварийных выбросов горючих веществ в течение промежутка времени  $\tau$  при наличии периодически действующих источников зажигания предложено рассчитывать по формуле

$$P_b(\tau) = 1 - Q_b(\tau). \quad (2.24)$$

где  $Q(\tau)$  – вероятность незажигания облака от источников ИЗ, расположенных на территории, занятой ТВС. Для натурального логарифма  $Q(\tau)$  приведено соотношение

$$\ln Q(\tau) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J F_{ih} \cdot \mu_j \cdot \left[ (1 - a_j \cdot p_j) \cdot e^{-\lambda_j \cdot p_j \cdot d_{ih}} \right], \quad (2.25)$$

где  $i$  – номер элементарной площадки в области, занятой облаком ТВС,  $i = 1, 2, \dots, I$ ;

$j$  – номер источника воспламенения на элементарной площадке  $j = 1, 2, \dots, J$ ;

$F_{ih}$  – площадь  $i$ -й элементарной площадки, га;

$\mu_j$  – плотность распределения источников зажигания, шт/га;

$a_j$  – доля времени активности  $j$ -го источника зажигания:

$$a_j = \frac{\tau_j}{\tau_j + \tau_a}, \quad (2.26)$$

$\tau_j$  – время, в течение которого источник зажигания активен, мин;

$\tau_a$  – время (период) между периодами активации источника зажигания, мин;

$p_j$  – физический потенциал воспламенения  $j$ -го источника зажигания;

$\lambda_j$  – частота активации  $j$ -го источника зажигания, 1/мин, рассчитываемая как:

$$\lambda_j = \frac{1}{\tau_j + \tau_a}, \quad (2.27)$$

$d_{ih}$  – время, в течение которого источник был в контакте с облаком ТВС, мин (рекомендуется принимать  $d_{ih} = 60$  мин).

Численные значения вышеперечисленных параметров приведены в соответствующих таблицах [91], [92].

## **2.4.2 Источники неопределенности, сопутствующей оценке условной вероятности сценариев аварии**

По общему мнению, в полном "бюджете неопределенности" параметров аварийного риска наибольший вклад принадлежит параметрам, оценивающим вероятность. Так, зеленая книга TNO CPR-16E [149] сообщает, что при количественной оценке неопределенности итогов экспериментов "COVO" и "LPG-study" для параметров, характеризующих вероятность событий, обычно принимались коэффициенты неопределенности  $10 \div 100$ , в то время как для параметров, характеризующих ущерб – не более 10.

В данном разделе не будет выполняться типизация источников неопределенности. Укажем лишь, что при оценке перечня сценариев аварии и оценке их вероятностей весьма значим эпистемический аспект, связанный с квалификацией эксперта, выполняющего КОР.

Велика скрытая неопределенность точечных значений условных вероятностей, рекомендуемых Руководствами по КОР. Это становится очевидным, если учесть, что возможность воспламенения ТВС даже на конкретном ВПОО с известным окружением сильнейшим образом зависит от большого числа обстоятельств – периода года, метеоусловий на момент аварии, времени суток и т.д.

## **2.5 Анализ неопределенности третьего этапа процедуры КОР**

Третий этап количественной оценки аварийного риска включает выполнение большого количества расчетов. Физико-математические модели, используемые для описания испарения пролива, сгорания или взрыва топливоздушную смеси, отличаются большим разнообразием, что порождает значительную модельную неопределенность. В рамках данного раздела диссертации поражающие факторы различных сценариев аварии назовем их целевыми метриками. Таким образом, предметом исследования этого раздела будет являться неопределенность, сопровождающая оценку целевых метрик взрывопожарных сценариев аварии.

### **2.5.1 Поражающие факторы сценария "Пожар пролива"**

Целевой метрикой данного сценария естественно считать интенсивность теплового потока пожара пролива  $I(X)$ , кВт/м<sup>2</sup>, падающего на объект-мишень, расположенный на рас-

стоянии  $X$  от центра пролива. В Руководствах по КОР пламя пожара (пролива или газового факела) моделируется либо точкой, либо твердым телом простой формы (цилиндр, конус, усеченный конус). "Твердотельные" модели пламени построены на допущении, что излучает исключительно внешняя поверхность "тела" пламени. На самом деле, конечно, ситуация существенно сложнее, тепловое излучение генерируется всеми частями объема, занятого пламенем, имеющими к тому же различную температуру, [43].

Полусферический тип модели излучения пламени, по CPR-14E [148], означает, что пламя, начиная с некоторого расстояния, аппроксимируется точечным источником, а интенсивность его теплового излучения  $I$ , кВт/м<sup>2</sup>, с расстоянием  $X$ , м (от центра пламени до объекта-мишени) убывает как  $X^{-2}$ :

$$I = \frac{m' \cdot F_s \cdot \Delta H_c}{4 \cdot \pi \cdot X^2}, \quad (2.28)$$

где  $m'$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/м<sup>2</sup>·с;

$F_s$  – доля тепла горения, расходуемого на излучение (радиационные потери);

$\Delta H_c$  – удельная теплотворная способность горючего вещества, Дж/кг.

Поглощение инфракрасного излучения атмосферой в (2.28) не учтено. Более сложные типы моделей – полевые и интегральные – основаны на решении системы уравнений Навье-Стокса.

Руководства по КОР Ростехнадзора для оценки целевых метрик сценария "пожар пролива" рекомендуют использовать Методику МЧС РФ [61]. Если судить по методу расчета геометрического фактора, в качестве формы пламени в ней принят цилиндр. Для однокомпонентных химических веществ:

а) среднеповерхностная плотность теплового излучения  $E_f$ , кВт/м<sup>2</sup>, может быть рассчитана по формуле

$$E_f = \frac{0.4 \cdot m' \cdot \Delta H_c}{\left(1 + 4 \cdot \frac{L_{пл}}{d_{пр}}\right)}, \quad (2.29)$$

где  $\Delta H_c$  – удельная теплота сгорания, кДж/кг;

$L_{пл}$  – длина пламени, м;

$d_{пр}$  – диаметр пламени (пролива), м;

б) удельная скорость выгорания  $m'$ , кг/м<sup>2</sup>·с – по корреляции Бюргесса (Burgess), [173]:

$$m' = \frac{0.001 \cdot \Delta H_c}{L_g + c_p \cdot (T_b - T_a)}, \quad (2.30)$$

где  $L_g$  – удельная теплота испарения жидкости, кДж/кг;

$c_p$  – удельная теплоемкость жидкости, кДж/кг·К;

$T_b$  – температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К;

$T_a$  – температура окружающей среды, К.

Для четырех веществ (сжиженный природный газ, СУГ (пропан-бутан), бензин и дизельное топливо) значения  $E_f$  и  $m'$  в [61] заданы в табличной форме с учетом их зависимости от эффективного диаметра пролива  $d_{пр}$ . Кроме того, для пожаров проливов нефти и нефтепродуктов приведена аналитическая зависимость  $E_f = E_f(d_{пр})$ , впервые предложенная Муданом (Mudan) в 1984 году, [203]:

$$E_f = 140 \cdot e^{-0.12 \cdot d_{пр}} + 20 \cdot \left(1 - e^{-0.12 \cdot d_{пр}}\right), \quad (2.31)$$

в которой: а) 140 кВт/м<sup>2</sup> – плотность теплового излучения "горячих" пятен поверхности пламени; б) 20 кВт/м<sup>2</sup> – то же у "холодных" пятен, т.е. покрытых сажей; в)  $e^{-0.12 \cdot d_{пр}}$  – доля поверхности пламени, не покрытая сажей.

В отличие от более раннего ГОСТ Р 12.3.047-98 [24] нормативная методика [61] учитывает влияние ветра:

1) на длину пламени  $L_{пл}$ , м:

а) при  $u_* \geq 1$ :

$$L_{пл} = 55 \cdot d_{пр} \cdot \left( \frac{m'}{\rho_B \cdot \sqrt{g \cdot d_{пр}}} \right)^{0.67} \cdot u_*^{0.21}, \quad (2.32)$$

б) при  $u_* < 1$ :

$$L_{пл} = 42 \cdot d_{пр} \cdot \left( \frac{m'}{\rho_B \cdot \sqrt{g \cdot d_{пр}}} \right)^{0.61}, \quad (2.33)$$

где  $u_*$  – характерная скорость ветра (безразмерная):

$$u_* = u_w \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{п}}{m' \cdot g \cdot d_{пр}}}, \quad (2.34)$$

$\rho_{п}$  – плотность насыщенных паров жидкости при температуре кипения, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_B$  – плотность атмосферного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$u_w$  – средняя скорость ветра, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, 9.81 м/с<sup>2</sup>;

2) на отклонение пламени от вертикали под действием ветра на угол  $\theta_{пл}$ :

$$\cos \theta_{пл} = \begin{cases} 1, & \text{при } u_* < 1 \\ \frac{1}{\sqrt{u_*}}, & \text{при } u_* \geq 1 \end{cases} \quad (2.35)$$

Для расчета фактора видности  $F_q$  (углового коэффициента облученности) пламени, имеющего форму наклоненного цилиндра, в [61] предложены соотношения:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (2.36)$$

где  $F_V$ ,  $F_H$  – геометрические факторы видности для вертикальной и горизонтальной проекций, соответственно, определяемые для объектов-мишеней, расположенных в 90°-м секторе в направлении наклона пламени:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & -E \cdot \arctg D + E \cdot \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta_{пл})}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) + \\ & + \frac{\cos \theta_{пл}}{C} \cdot \left[ \arctg \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta_{пл}}{F \cdot C} \right) + \arctg \left( \frac{F \cdot \sin \theta_{пл}}{C} \right) \right] \end{aligned} \right\}, \quad (2.37)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \arctg \left( \frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta_{пл}}{C} \cdot \left[ \arctg \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta_{пл}}{F \cdot C} \right) + \arctg \left( \frac{F \cdot \sin \theta_{пл}}{C} \right) - \right] \\ & - \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta_{пл})}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2.38)$$

где:

$$\begin{aligned} a &= \frac{2 \cdot L_{пл}}{d_{пр}}, \quad b = \frac{2 \cdot X}{d_{пр}}, \quad A = \sqrt{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta_{пл}}, \\ B &= \sqrt{a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta_{пл}}, \quad C = \sqrt{1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta_{пл}}, \\ D &= \sqrt{\frac{b-1}{b+1}}, \quad E = \frac{a \cdot \cos \theta_{пл}}{b - a \cdot \sin \theta_{пл}}, \quad F = \sqrt{b^2 - 1}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Последний параметр, который необходим для расчета целевой метрики данного сценария – это прозрачность атмосферного воздуха  $\tau(X)$  для потока теплового излучения, генерируемого пламенем пожара, на расстоянии  $X$ , м, от центра пожара (пролива). Подход нормативной методики [61] к расчету  $\tau(X)$  очень упрощен, он не учитывает ни температуру, ни влажность атмосферного воздуха:

$$\tau(X) = \exp\left[-7 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5 \cdot d_{\text{пр}})\right]. \quad (2.40)$$

Окончательно, целевая метрика сценария рассчитывается по формуле

$$I(X) = E_f \cdot F_q \cdot \tau(X). \quad (2.41)$$

### 2.5.2 Поражающие факторы сценария "Длительное испарение пролива"

Анализ начнем с исследования подходов к моделированию испарения ЛВЖ – жидкостей третьей категории по В.Маршаллу. Целевой метрикой сценария естественно назвать интенсивность (удельную массовую скорость) испарения жидкости  $w$ , кг/м<sup>2</sup>·с, с зеркала пролива. В отсутствие *подходящих* источников зажигания в области, занятой паровоздушной смесью, процесс испарения может быть длительным.

Подходящими источниками зажигания будем считать такие, чей энергетический потенциал превышает пороговый для рассматриваемого вещества. К опасному диапазону концентраций отнесем диапазон, в котором появление ИЗ вызывает сгорание ТВС в том или ином режиме, причем это не обязательно привычный интервал [НКПР, ВКПР].

Внимательный анализ свидетельствует, что понятие "опасная концентрация" горючего вещества в Руководствах по КОР определено нечетко, и эта нечеткость обусловлена атмосферной турбулентностью. Из-за нее концентрация вещества в облаке ТВС случайным образом варьирует, а потому величина средней концентрации сильно зависит от периода осреднения.

Согласно регламентирующим документам по пожарной безопасности (например, ГОСТ 12.1.044-89 [17]) экспериментальное определение важнейших параметров пожаровзрывоопасности веществ и материалов осуществляется в лаборатории при проведении специальных испытаний, для которых характерны ламинарные потоки и преобладание молекулярных механизмов диффузии. В этих обстоятельствах учет времени осреднения неважен, поскольку значение среднего нечувствительно к периоду осреднения.

На наш взгляд, именно этим обстоятельством объясняется тот факт, что в ряде отечественных и зарубежных Руководств по КОР в качестве границы взрывоопасной области принимается значение 0.5 НКПР. Между тем, величина мгновенной концентрации горючего вещества внутри облака ТВС в точке расположения локального ИЗ особенно важна для импульсных ИЗ типа искры.

Полная масса паров горючего вещества в ТВС будет определяться тремя параметрами: а) площадью пролива  $S_{\text{пр}}$ ; б) величиной удельной массовой скорости испарения  $w$ ;

в) продолжительностью испарения  $t_{\text{исп}}$ . Отечественные НМД ограничивают длительность испарения, учитываемую в расчетах, величиной  $t_{\text{исп}} = 3600$  с.

Анализ показывает, что подходы анализируемых нами Руководств по КОР к моделированию процесса испарения пролива различаются как в качественном, так и в количественном отношении. Моделирование данного сценария отечественными Руководствами по КОР неудовлетворительно, поэтому дополнительно проанализируем подходы зарубежных Руководств.

Согласно методическому подходу [61], а также подходу "Общих правил взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств..." [114] интенсивность испарения:

$$w = 10^{-6} \cdot \eta_{\text{и}} \cdot \sqrt{\mu} \cdot P_{\text{н}}, \quad (2.42)$$

где  $\eta_{\text{и}}$  – поправочный коэффициент, принимаемый для помещений по таблице 2.8 (при проливе жидкости вне помещения разрешено принимать  $\eta_{\text{и}} = 1$ );

$$[\mu] = \text{кг/кмоль}; [P_{\text{н}}] = \text{кПа}.$$

Таблица 2.8 – *Зависимость поправочного коэффициента  $\eta_{\text{и}}$  от скорости воздушного потока, [61]*

Скорость воздушного потока, м/с	Значение коэффициента $\eta$ при температуре воздуха $t, ^\circ\text{C}$ ,				
	10	15	20	30	35
0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.1	3.0	2.6	2.4	1.8	1.6
0.2	4.6	3.8	3.5	2.4	2.3
0.5	6.6	5.7	5.4	3.6	3.2
1.0	10.0	8.7	7.7	5.6	4.6

Данный подход представляется нам спорным, поскольку:

– во-первых, скорость ветра на открытом пространстве принято задавать на "стандартной" высоте 10 м. А величина скорости ветра 1 м/с на высоте 10 м практически соответствует штилевым условиям на уровне пролива. Следовательно, [61] фактически игнорирует зависимость интенсивности испарения "неперегретых" жидкостей от скорости ветра, что является серьезным изъяном методики, поскольку, как известно, удельная массовая скорость испарения жидкостей третьей категории по В.Маршаллу контролируется в основном именно скоростью ветра. Типичную зависимость интенсивности (удельной массовой скорости) испарения таких жидкостей от скорости ветра иллюстрирует рисунок 2.1, заимствованный из монографии В.Маршалла [58]:

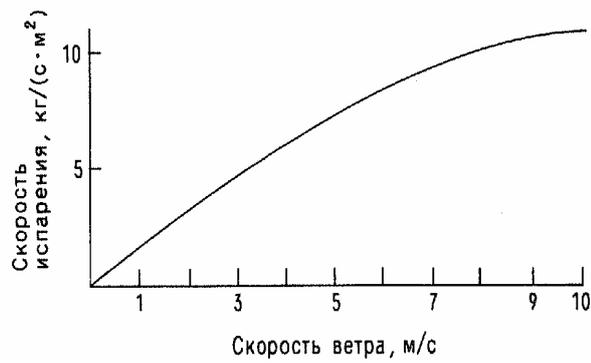


Рисунок 2.1 – Зависимость интенсивности испарения жидкости третьей категории от скорости ветра, [58]

Из графика 2.1 следует, что при возрастании скорости ветра от 1 до 10 м/с интенсивность испарения увеличивается примерно в шесть раз (масштаб по оси ординат в [58] указан неверно);

– во-вторых, диапазон температур таблицы 2.8 покрывает далеко не всю область температурных условий в атмосфере.

Таким образом, нормативная методика МЧС РФ [61] пригодна для моделирования испарения пролива ЛВЖ только летом и в квазиштилевых условиях.

Как отмечено в нашей статье [46], аналогия движения испаряющихся с поверхности жидкости молекул с газовым потоком под действием разности давлений и использование уравнения Менделеева-Клапейрона позволила В.Г.Мацаку и Л.К.Хоцянову в своей статье [59] вывести уравнение для интенсивности испарения жидкости:

$$w = f_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot P_{\text{пов}} \cdot \Delta P \cdot \mu}{\hat{R} \cdot T_{\text{пр}}}}, \quad (2.43)$$

где  $f_1$  – поправочный коэффициент, учитывающий столкновение покидающих жидкую фазу молекул с молекулами воздуха ( $f_1 \ll 1$ );

$P_{\text{пов}}$  – давления пара у поверхности жидкости, Па;

$\Delta P$  – разность давлений пара у поверхности и на некотором удалении о нее, Па;

$T_{\text{пр}}$  – температура пролива, К.

С учетом того обстоятельства, что в атмосфере пары веществ (кроме воды) отсутствуют,  $\Delta P = P = P_{\text{н}}$ . В итоге, постулируя справедливость для всех веществ корреляции, полученной сотрудниками Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) в опытах с испарением воды, авторы [59] получили:

$$w = (5.38 + 4.1 \cdot u) \cdot P_{\text{н}} \cdot \sqrt{\mu}, \quad (2.44)$$

где  $[w] = \text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$ ,  $[P_n] = \text{мм.рт.ст.}$ ,  $[\mu] = \text{г/моль}$ , а  $[u] = \text{м/с}$ .

Выражение (2.44) в размерности  $[w] = \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $[\mu] = \text{кг/кмоль}$ ,  $[P_n] = \text{кПа}$  переходит в (2.45), существенно отличное от (2.42):

$$w = \frac{\sqrt{1000}}{0.133 \cdot 10^3 \cdot 3.6 \cdot 10^3} (5.38 + 4.1 \cdot u) \cdot P_n \cdot \sqrt{\mu} =$$

$$= 6.6 \cdot 10^{-6} \cdot (5.38 + 4.1 \cdot u) \cdot P_n \cdot \sqrt{\mu}. \quad (2.45)$$

Как указано нами в [46], теория В.Г.Мацака и Л.К.Хочянова испарения жидкости из пролива, основанная на положениях молекулярной диффузии газов, приемлема для закрытых помещений, однако непригодна для открытого пространства при обычных метеоусловиях и масштабах аварийных проливов, поскольку в последнем случае ведущая роль принадлежит турбулентному переносу примесей в атмосфере.

В Руководстве по безопасности [89] Ростехнадзора удельную массовую скорость испарения вещества из аварийного пролива,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , предложено рассчитывать по формуле

$$w = 10^{-6} \cdot (5.38 + 4.1 \cdot u_{0\text{эфф}}) \cdot \sqrt{\mu} \cdot P_n, \quad (2.46)$$

где  $[P_n] = \text{мм.рт.ст.}$ ;  $[\mu] = \text{кг/моль}$ ;

$u_{0\text{эфф}}$  – эффективная скорость движения вторичного облака над поверхностью пролива, м/с (понятие *эффективной* скорости движения облака в [89] не пояснено). Вторичным облаком Руководство по безопасности [89] называет облако, образующееся в результате длительного испарения опасного вещества с подстилающей поверхности и распространяющееся по ветру от места выброса.

В размерности  $[w] = \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $[\mu] = \text{кг/кмоль}$ ,  $[P_n] = \text{кПа}$  (2.46) преобразуется к виду

$$w = 10^{-6} \cdot (5.38 + 4.1 \cdot u_{0\text{эфф}}) \cdot \sqrt{\frac{\mu}{1000}} \cdot 7.52 \cdot P_n = 2.4 \cdot 10^{-7} \cdot (5.38 + 4.1 \cdot u_{0\text{эфф}}) \cdot \sqrt{\mu} \cdot P_n. \quad (2.46-1)$$

Таким образом, подход Руководства по безопасности [89] к моделированию процесса испарения является симбиозом теории В.Г.Мацака и Л.К.Хочянова, основанной на положениях молекулярной диффузии, и отдельных элементов теории атмосферной турбулентности.

Формирующееся из пролива облако под действием ветра приобретает форму длинного приземного "факела". В Руководстве по безопасности [89] постулировано, что форма любого поперечного сечения этого вторичного облака является прямоугольником, нижняя сторона которого расположена на земной поверхности. Это обусловлено тем обстоя-

тельством, что плотность паров (или газа) подавляющего числа углеводородов и прочих опасных веществ, находящихся в крупнотоннажном хозяйственном обороте, превышает плотность воздуха. Иначе говоря, они относятся к категории "тяжелых газов".

Учитывая, что для некипящих жидкостей лимитирующим фактором для интенсивности испарения является ветровой унос пара, зарубежные Руководства по КОР [147], [148] предлагают осуществлять ее расчет по корреляции Кавамуры и МакКея (Kawamura & MacKay), [191], полученной ими на основании собственных экспериментальных данных:

$$w = k_m \cdot \frac{P_n \cdot \mu}{\hat{R} \cdot T_{пр}}, \quad (2.47)$$

где  $k_m$  – коэффициент переноса массы, м/с:

$$k_m = C_{K\&M} \cdot u_w^{0.78} \cdot d_{пр}^{-0.11} \cdot Sc_n^{-0.67}, \quad (2.48)$$

$C_{K\&M}$  – константа Кавамуры-МакКея, равная 0.004786;

$Sc_n = \frac{\nu_n}{D_a}$  – число Шмидта, для пара,  $Sc_n \approx 0.8$ ;

$\nu_n$  – коэффициент кинематической вязкости пара, м<sup>2</sup>/с;

$D_a$  – коэффициент турбулентной диффузии пара в атмосфере, м<sup>2</sup>/с.

Эта модель игнорирует зависимость скрытой теплоты парообразования от температуры, и, кроме того, предполагает равенство температуры пролива  $T_{пр}$  и температуры атмосферы  $T_a$ , а также ее постоянство по всей глубине пролива.

Испарение из пролива "перегретых" жидкостей (второй категории по В.Маршаллу) подчиняется несколько иным закономерностям. В Руководстве по КОР [61] для расчета удельной массовой скорости испарения  $w$ , кг/(м<sup>2</sup>·с, СУГ со свободной поверхности пролива предложена корреляция, справедливая для моментов времени  $t > 10$  с после разрушения емкости:

$$w(t) = \frac{T_a - T_b}{L_b} \cdot \left[ t^{-1/2} \cdot \left( \frac{\lambda_s \cdot C_s \cdot \rho_s}{\pi} \right)^{0.5} + \frac{0.035 \cdot u^{0.8} \cdot \lambda_b}{\nu_b^{0.8} \cdot d_{пр}^{0.2}} \right], \quad (2.49)$$

где  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности подстилающей поверхности, Вт/м·К;

$C_s$  – удельная теплоемкость подстилающей поверхности, Дж/кг·К;

$\rho_s$  – плотность подстилающей поверхности, кг/м<sup>3</sup>;

$T_a$  – начальная температура подстилающей поверхности (атмосферы), К;

$T_b$  – температура кипения жидкости, К;

$\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_{\text{в}}$ ;

$\nu_{\text{в}}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$u$  – скорость воздушного потока *над* поверхностью испарения,  $\text{м}/\text{с}$ . Не вполне ясно, как задавать эту величину, поскольку под скоростью ветра  $u_{\text{в}}$  принято понимать усредненную за 20 минут величину  $\bar{u}_{10\text{в}}$  на высоте флюгера (10 м). По мере приближения к подстилающей поверхности скорость ветра убывает и становится равной нулю на некоторой высоте  $z_0$  над подстилающей поверхностью (в "слое шероховатости").

### 2.5.3 Поражающие факторы сценария "BLEVE"

Сценарии BLEVE и "Огненный шар" на самом деле являют собой две стадии одного и того же сценария аварии. Их отдельное рассмотрение обусловлено различными поражающими факторами, сопровождающими эти стадии. Реализация рассматриваемого сценария возможна при относительно продолжительном нахождении резервуара с горючим веществом в очаге пожара. Одним из исходов подобной ситуации станет взрыв обогреваемого резервуара, называемый BLEVE.

Феноменологически это выглядит как мгновенный выброс в окружающее пространство парокапельного облака переобогащенной горючей смеси, периферийная часть которого сгорает в дефлаграционном режиме, остальная догорает в виде огненного шара. Выброс происходит при катастрофическом разрушении резервуара растущим внутренним давлением из-за ослабления резервуарной оболочки вследствие нагрева.

Термин BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), по мнению В.Маршалла [58], ввел в 60-х гг. прошлого века американец У.Уэллс (Walls). Однако авторы монографии [250] из университета г. Дельфта отдают приоритет более ранней работе Смита (Smith), Марша (Marsh) и Уэллса (Walls), датированной 1957-м годом.

По мнению многих авторов, [50], BLEVE, всегда сопровождаемый разлетом осколков оболочки резервуара, является наиболее опасным из всех взрывопожарных сценариев на резервуарах типа РГС, поскольку:

- во-первых, разлет осколков часто порождает эскалацию аварии по механизму "домино";
- во-вторых, согласно статистическим данным [173], при авариях на объектах химической промышленности более всего погибает людей не от огня или теплового облучения, а именно из-за попадания в них летящих осколков;
- в-третьих, после BLEVE резервуара с горючей жидкостью всегда образуется огненный шар, излучающий мощный тепловой поток.

Вообще говоря, явление взрывного гомогенного парообразования во всем объеме перегретой жидкой фазы (flash) может наблюдаться в любой жидкости, не обязательно горючей. Перегретой, как известно, называется жидкость, температура которой превышает температуру ее кипения при данном давлении.

Предположим, что в резервуаре, обогреваемом пламенем внешнего пожара, находится горючая жидкость. Избыточное давление в паровом пространстве резервуара будет равно давлению ее насыщенного пара, соответствующему температуре жидкой фазы. Пусть по какой-либо причине давление в сосуде резко понизится (например, в результате мгновенного разрушения оболочки), тогда жидкость окажется перегретой и мгновенно вскипит. Причем, в отличие от обычного пузырькового кипения (называемого *гетерогенным*), при котором паровые пузырьки образуются только у теплопроводящей стенки, в случае BLEVE пузырьки пара (диаметром  $1 \div 3$  мм) образуются за время около 1 мс одновременно во всем объеме жидкой фазы.

В результате такого *гомогенного* вскипания, протекающего в виде *парового взрыва*, пузырьки пара мгновенно превратят всю массу жидкости в капельно-паровое облако с характерным диаметром капли 0.1 мм, [250]. Поскольку жидкость в резервуаре по условию горючая, а источник зажигания налицо, это облако переобогащенной парок капельной смеси загорится и будет сгорать по механизму "огненного шара", [42].

Имеющаяся мировая статистика образования огненных шаров на резервуарах с ЛВЖ, сопровождающих BLEVE, свидетельствует, что все они произошли на небольших резервуарах сферической либо цилиндрической формы, расположенных горизонтально, [50]. Поражающими факторами BLEVE являются воздушная взрывная волна и летящие обломки оболочки (скорость последних значительна, по-видимому, только при авариях на резервуарах с СУГ).

Для вычисления избыточного давления и импульса ВВВ необходима величина энергетического потенциала взрыва. В этой связи в качестве целевой метрики данного аварийного сценария естественно избрать именно этот параметр.

Руководства по КОР Ростехнадзора предлагают рассчитывать поражающие факторы сценария "BLEVE" с использованием нормативной методики МЧС РФ [61]. Однако, как показали наши оценки, [42], она непригодна для моделирования BLEVE на резервуаре с ЛВЖ. В этой связи выполним оценки интересующих нас параметров аварии на основании модели из "желтой" книги CPR-14E TNO [148], дополненной собственными термодинамическими соображениями.

Метод оценки энергетического потенциала BLEVE, рекомендуемый CPR-14E, довольно сложен и подразумевает использование специальных термодинамических таб-

лиц, которые в самой "желтой" книге не приведены (что является, безусловно, ее серьезным методическим изъяном).

Вместо использования подобных таблиц выполним оценку термодинамического потенциала взрыва, основанную на общих термодинамических соображениях. Есть основания полагать, что поведение паровой и жидкой фаз содержимого резервуара после его раскрытия следует рассматривать как слабо взаимодействующие процессы. В диапазоне температур, верхняя граница которого сугубо меньше критической для флюида, его пар подчиняется законам идеального газа.

После того, как резервуарная оболочка лопнет, ее обломки избыточным давлением пара будут разбросаны на некоторое расстояние. Внутренняя энергия пара после разгерметизации резервуара уменьшится на величину совершенной им работы:

а) по разбрасыванию фрагментов оболочки, равной суммарной начальной кинетической энергии осколков;

б) против атмосферного давления при расширении пара,  $P_0 \cdot (V_{\text{пн2}} - V_{\text{пн1}})$ .

Термодинамическое состояние первичного пара в резервуаре определяется любыми двумя параметрами, например давлением  $P_1$  и температурой  $T_1$ . Внутренняя энергия первичного пара массой  $m_{\text{пн1}}$ , кг, в этом состоянии равна:

$$U_{\text{пн1}} = c_v \cdot T_1 \cdot m_{\text{пн1}}, \quad (2.50)$$

где  $c_v$  – удельная теплоемкость пара при постоянном объеме, Дж/кг·К.

Первичный пар, расширяясь, совершает работу против атмосферного давления. Кроме того, его энергия расходуется на разбрасывание осколков оболочки. Считая процесс расширения первичного пара адиабатическим ( $Q = 0$ ), запишем первое начало термодинамики в интегральной форме

$$\Delta U_{\text{пн}} = - \left( \int_{V_{\text{пн1}}}^{V_{\text{пн2}}} P \cdot dV_{\text{пн}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{оск}}} \frac{m_{\text{оск.i}} \cdot u_{\text{оск.i}}^2}{2} \right), \quad (2.51)$$

где  $V_{\text{пн}}$  – объем первичного пара, м<sup>3</sup>;

$P$  – давление, Па;

$m_{\text{оск.i}}$  – масса  $i$ -го осколка, кг;

$u_{\text{оск.i}}$  – начальная скорость  $i$ -го осколка, м/с.

*Примечание: в очень грубом приближении массы всех осколков приняты равными, более полная постановка задачи требует учета распределения осколков по массе.*

Логично именно величину  $\Delta U_{\text{пн}}$  считать энергетическим потенциалом  $E_{\text{eff}}$  (эффективной энергией) взрыва, поскольку она определяет мощность поражающих факторов.

Конечное термодинамическое состояние первичного пара соответствует атмосферному давлению,  $P_2 = P_0$ . С учетом (2.50):

$$c_v \cdot m_{п1} \cdot (T_1 - T_2) = \int_{V_{п1}}^{V_{п2}} P \cdot dV_{п1} + \sum_{i=1}^{N_{оск}} \frac{m_{оск.i} \cdot u_{оск.i}^2}{2}, \quad (2.52)$$

где  $T_2$  – температура первичного пара в конечном термодинамическом состоянии (при атмосферном давлении  $P_0$ ), К.

После интегрирования уравнения адиабаты  $P \cdot V_{п1}^\gamma$ , получим:

$$c_v \cdot m_{п1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{P_1 \cdot V_{п1}}{1 - \gamma} \cdot \left( \left( \frac{V_{п1}}{V_{п2}} \right)^{\gamma-1} - 1 \right) + \sum_{i=1}^{N_{оск}} \frac{m_{оск.i} \cdot u_{оск.i}^2}{2}. \quad (2.53)$$

Таким образом, с учетом выполнения работы по разбрасыванию обломков оболочки, разница температур пара (его остывание) окажется больше, чем в "безоболочечном" случае, на величину

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^{N_{оск}} m_{оск.i} \cdot u_{оск.i}^2}{2 \cdot c_v \cdot m_{п1}}. \quad (2.54)$$

Суммарную начальную кинетическую энергию обломков – второе слагаемое правой части (2.52) – оценим с использованием корреляции Холдена и Ривса для средней скорости осколков (обломков), рекомендованной Руководством по КОР [173]:

$$u_{оск} = K_{оск} \cdot u_{зв} \cdot \exp(a_{оск} \cdot \ln \bar{P}'_1 + b_{оск}), \quad (2.55)$$

где  $K_{оск}$  – поправочный коэффициент, зависящий от соотношения масс осколка и оболочки  $M_{рез}$ , кг:

$$K_{оск} = 1.306 \cdot \lambda_{оск} + 0.308, \quad (2.56)$$

$\lambda_{оск}$  – доля массы осколка от полной массы оболочки резервуара;

$u_{зв,п}$  – скорость звука в паровой фазе вещества при атмосферном давлении, м/с;

$\bar{P}'_1 = \frac{(P_1 - P_0) \cdot V_{рез}}{M_{рез} \cdot u_{зв1}^2}$  – безразмерное избыточное давление в резервуаре в момент его

разрушения;

$P_1$  – давление в резервуаре в момент его разрушения, Па;

$u_{зв1}$  – скорость звука в паровой фазе вещества в резервуаре перед взрывом, м/с;

$a_{\text{оск}}$ ,  $b_{\text{оск}}$  – безразмерные коэффициенты, значения которых в зависимости от формы резервуара и числа осколков приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Значения коэффициентов  $a_{\text{оск}}$  и  $b_{\text{оск}}$  [173]

Количество осколков	Сфера		Цилиндр	
	$a_{\text{оск}}$	$b_{\text{оск}}$	$a_{\text{оск}}$	$b_{\text{оск}}$
2	0.622	0.213	0.815	0.355
10	0.598	0.221	0.598	0.565
100	0.603	0.287	0.592	0.603

Далее обратимся к оценке поведения жидкой фазы флюида при взрыве. После разгерметизации оболочки и падения давления до атмосферного начнется гомогенное вскипание флюида с образованием капель. Изменение внутренней энергии жидкой фазы:

$$\Delta U_{\text{ж}} = c_{\text{жф}} \cdot (m_{\text{ж1}} \cdot T_1 - m_{\text{ж2}} \cdot T_3), \quad (2.57)$$

где  $c_{\text{жф}}$  – удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг·К;

$m_{\text{ж1}}$  – начальная масса жидкой фазы, кг;

$m_{\text{ж2}}$  – конечная масса жидкой фазы, кг;

$T_3$  – конечная температура жидкой фазы;

равно сумме слагаемых:

- а) тепла, израсходованного на образование вторичного пара;
- б) работы вторичного пара против внешнего давления;
- в) поверхностной энергии капель (работы по образованию свободной поверхности).

Будем считать, что в процессе гомогенного вскипания и диспергирования жидкости паровыми пузырьками образуются капли со средним диаметром  $d_{\text{к}}$ .

Совокупная теплота фазового перехода (испарения):

$$Q_{\text{исп}} = \Delta H_{\text{б}} \cdot (m_{\text{ж1}} - m_{\text{ж2}}), \quad (2.58)$$

где  $\Delta H_{\text{б}}$  – удельная теплота испарения флюида, Дж/кг;

$m_{\text{ж1}}$ ,  $m_{\text{ж2}}$  – начальная и конечная массы жидкой фазы (в капельном состоянии), кг.

Работа вторичного пара в условиях фазового перехода, [101]:

$$A_{\text{вп}} = P_{\text{н}} \cdot m_{\text{вп}} \cdot (v_{\text{вп}} - v_{\text{ж}}), \quad (2.59)$$

где  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенного пара, Па;

$m_{\text{вп}} = m_{\text{ж1}} - m_{\text{ж2}}$  – масса вторичного пара, кг;

$v_{\text{п}}$  – удельный объем вторичного пара, м<sup>3</sup>/кг;

$v_{ж}$  – удельный объем жидкой фазы, м<sup>3</sup>/кг.

С учетом того, что после разгерметизации оболочки кипение флюида происходит при атмосферном давлении, а также  $v_{п} \gg v_{ж}$ :

$$A_{вп} \approx P_0 \cdot v_{п} \cdot (m_{ж1} - m_{ж2}). \quad (2.60)$$

Величина поверхностной энергии капель жидкой фазы

$$E_{пов} = \varphi(T_b) \cdot S_k = \pi \cdot \varphi(T_b) \cdot d_k^2 \cdot N_k = \frac{3 \cdot \varphi(T_b) \cdot m_{ж2}}{16 \cdot \rho_{ж} \cdot d_k}, \quad (2.61)$$

где  $\varphi(T_b)$  – коэффициент поверхностного натяжения флюида при температуре его кипения под атмосферным давлением, кг/с<sup>2</sup>;

$S_k$  – совокупная поверхность капель, м<sup>2</sup>;

$N_k$  – число образовавшихся капель.

Температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения  $\varphi(T)$  можно учесть, например, по уравнению Гуггенхайма-Катаямы (Guggenheim-Katayama):

$$\varphi(T) = \varphi_0 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_{кр}}\right)^n, \quad (2.62)$$

где  $\varphi_0$  – некоторая постоянная;

$T_{кр}$  – критическая температура жидкости, К;

$n$  – показатель степени, для органических жидкостей равный 1.22.

Вообще говоря, следует учесть эффект увеличения давления насыщенного пара  $\Delta P_n$  вблизи искривленной поверхности. Для сферы диаметром  $d_k$  по формуле Вильяма Томсона, [101]:

$$\Delta P_n \approx \frac{4 \cdot v_{ж} \cdot \varphi(T_3)}{v_{п} \cdot d_k} = \frac{4 \cdot \rho_{вп} \cdot \varphi(T_3)}{\rho_{ж} \cdot d_k}. \quad (2.63)$$

Повышение давления насыщенного пара означает, что капли будут кипеть при более высокой температуре, чем жидкость с плоской поверхностью.

Подытоживая, с учетом сохранения массы флюида  $m_{ж1} = m_{ж2} + m_{вп}$ , запишем первое начало термодинамики для жидкой фазы:

$$c_{жф} \cdot m_{ж1} \cdot T_1 = c_{жф} \cdot m_{ж2} \cdot T_3 + \Delta H_b \cdot (m_{ж1} - m_{ж2}) + c_v \cdot (m_{ж1} - m_{ж2}) \cdot T_3 + \frac{P_0 \cdot (m_{ж1} - m_{ж2})}{\rho_{вп}} + \frac{3 \cdot \varphi(T_3) \cdot m_{ж2}}{16 \cdot d_k \cdot \rho_{ж}}. \quad (2.64)$$

Это уравнение можно использовать для нахождения массы жидкой фазы  $m_{ж2}$  флюида после взрыва.

В качестве поражающего фактора при разрушении резервуара важно учесть разлетающиеся осколки оболочки. Руководства по КОР Ростехнадзора рекомендуют оценивать их скорость с помощью расчетных соотношений СТО Газпром 2-2.3-400-2009 [107]. Для модуля начальной скорости разлета осколков оболочки сосуда предложена корреляция

$$|\vec{V}_{0\text{coc}}| = \sqrt{\frac{m_{г.\text{coc}} \cdot A_r}{m_{\text{об.coc}}}}, \quad (2.65)$$

где  $A_r$  – удельная потенциальная энергия сжатого газа, Дж/кг, которую [107] рекомендует оценивать по соотношению (Ж.5). Однако последнее следует признать ошибочным, поскольку в нем не соблюдено правило размерностей. Вместо него для оценки величины  $A_r$  может быть использовано соотношение

$$A_r = c_v \cdot T_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma_r}{\gamma_r - 1}} \right] = c_v \cdot T_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_1} \right)^{\frac{\gamma_r - 1}{\gamma_r}} \right], \quad (2.66)$$

где  $c_v$  – удельная теплоемкость паровой фазы при постоянном объеме, Дж/кг·К.

#### 2.5.4 Поражающие факторы сценария "Огненный шар"

Взрыв резервуара с горючим веществом, обогреваемого пожаром (BLEVE), сопровождается выбросом переобогащенной двухфазной паровоздушной смеси, которая в последующем сгорает в атмосфере в диффузионном режиме как "огненный шар" (ОШ). Феноменологически "огненный шар" представляет собой ярко светящееся облако переменной формы, температура и мощность излучения которого непостоянна как во времени, так по поверхности. Однако в инженерной практике огненный шар обычно упрощенно аппроксимируют светящейся сферой, всплывающей в атмосфере под действием сил плавучести. Принимается, что интенсивность инфракрасного излучения ОШ постоянна.

Детальное моделирование физических процессов, сопровождающих сгорание облаков и струй переобогащенных паровоздушных смесей в открытой атмосфере, выполнено С.Е.Якушем в своей докторской (д.ф.-м.н.) диссертации [132]. В данной работе отдельно рассмотрено сгорание однофазных и двухфазных огненных шаров в открытой атмосфере – как с учетом, так и без учета радиационных потерь.

Использование теории размерности и соотношений подобия позволило автору сформулировать модельные уравнения в безразмерном виде. Математически модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, которая решалась численными методами. В результате автором получены весьма содержательные результаты о временной динамике важнейших параметров огненного шара:

- пространственного поля температуры, концентрации горючего вещества, кислорода и продуктов горения (в т.ч. сажи);
- диаметра;
- продолжительности жизни.

Следует отметить, что два последних параметра обладают некоторой терминологической неопределенностью, поскольку единого мнения специалистов в этом вопросе до сих пор нет. Например, диаметр огненного шара С.Е.Якуш в главе 4 [132] определяет как горизонтальный размер области, ограниченной изотермой  $T = 1000 \text{ К}$ .

По мнению В.Маршалла, [58], начало изучения "огненных" шаров было положено в работе Хая (High) [177], посвященной огненным шарам, возникающим при аварийных выбросах ракетного топлива. Уже в этой первой работе диаметр (максимальный) огненного шара и продолжительность его горения связывались с массой выброшенного ракетного топлива.

С учетом важности для пожарной безопасности такого явления, как огненный шар, исследованию этого феномена посвящено большое число экспериментов, а также работ, основанных на анализе реальных аварий. В литературе опубликовано множество эмпирических корреляций, связывающих наибольший диаметр  $D_{\text{ОШ}}$ , высоту подъема его центра  $H_{\text{ОШ}}$  и время жизни  $t_{\text{ОШ}}$  огненного шара с массой выброшенного горючего вещества ("топлива")  $M_0$ , кг. Большая часть из них, по свидетельству С.Е.Якуша [132], соответствует простым степенным зависимостям:

$$D_{\text{ОШ}} = a_1 \cdot M_0^{b_1}, \quad (2.67a)$$

$$t_{\text{ОШ}} = a_2 \cdot M_0^{b_2}, \quad (2.67б)$$

$$H_{\text{ОШ}} = a_3 \cdot M_0^{b_3}, \quad (2.67в)$$

где  $M_0$  – начальная масса горючего вещества в ОШ, кг.

В таблице 3.1. [132] приведено 15 таких зависимостей. Их анализ показывает, что корреляции (2.67а) для диаметра ОШ относительно близки: параметр  $a_1$  меняется менее чем вдвое, находясь в диапазоне  $(3.46 \div 6.48)$ , а показатель степени  $b_1$  близок к  $1/3$ . Это, по мне-

нию С.Е.Якуша, обусловлено тем, что объем воздуха, потребного для полного сгорания углеводородного топлива, многократно превышает объем самого топлива.

В этой связи "зрелый" ОШ в основном состоит из горячих продуктов сгорания и нейтральных компонентов атмосферного воздуха. С учетом примерно одинаковых значений удельной теплоты сгорания и температуры пламени у типичных углеводородов, объем ОШ в расчете на единицу массы топлива также примерно одинаков.

Одновременно обращает на себя внимание то обстоятельство, что величина параметров в зависимости (2.67б) у разных авторов различаются значительно –  $a_2 \in [0.186, 1.1]$ ,  $b_2 \in [0.17, 0.33]$ . Одну из причин этого С.Е.Якуш видит в терминологической неопределенности понятия "время жизни" ОШ, т.к. для его измерения применяются различные методики. Еще одной причиной, по его мнению, является различия в условиях постановки экспериментов.

В отношении зависимости (2.67в) для высоты центра шара различия также относительно невелики,  $a_3 \in [1.7, 7.9]$ . В итоге, по мнению авторов цитируемых [132] работ, величина  $H_{\text{ОШ}}$  находится в диапазоне  $(0.5 \div 1.5) \cdot D_{\text{ОШ}}$ .

В диссертации [132] отмечено, что весь диапазон условий формирования огненных шаров можно разделить на три области:

а) "мгновенный" тип, при котором газ выбрасывается в атмосферу за временной интервал, меньший времени, необходимого для его разбавления до ВКПР. В результате в атмосфере формируется переобогащенная ТВС, скорость всплывания которой определяется преимущественно силами плавучести;

б) "струевой" тип, характеризуемый продолжительностью истечения, достаточной для формирования в атмосфере стационарной струи с ядром, переобогащенным топливом;

в) промежуточный тип.

Опираясь на соображения размерности, С.Е.Якуш показал, что для ОШ "мгновенного типа" характерна зависимость  $t_{\text{ОШ}} \sim M_0^{0.166}$ , в то время как для "струевых" условий  $t_{\text{ОШ}} \sim M_0^{0.133}$ .

В качестве "целевых метрик" данного сценария естественно рассматривать интенсивность падающего на объект-мишень теплового потока и время жизни ОШ. Согласно нормативной методике [61] диаметр  $D_{\text{ОШ}}$  ("эффективный") и продолжительность  $t_{\text{ОШ}}$  его свечения могут быть оценены по следующим корреляциям:

$$D_{\text{ОШ}} = 6.48 \cdot M_0^{0.325}; \quad (2.68)$$

$$t_{\text{ОШ}} = 0.852 \cdot M_0^{0.26}; \quad (2.69)$$

а для величины геометрического фактора видности  $F_q$  – соотношением:

$$F_q = \frac{D_{\text{ОШ}}^2}{4 \cdot (H_{\text{ОШ}}^2 + X^2)}, \quad (2.70)$$

где  $X$  – расстояние по горизонтали от центра проекции ОШ до объекта-мишени, м.

Наконец, коэффициент прозрачности атмосферного воздуха для теплового излучения ОШ рекомендовано оценивать по формуле

$$\tau(X) = \exp\left(-0.0007 \cdot \left(\sqrt{X^2 + H_{\text{ОШ}}^2} - \frac{D_{\text{ОШ}}}{2}\right)\right). \quad (2.71)$$

### 2.5.5 Поражающие сценария "Факельное горение струи паров"

Факельное горения паров (газов) некоторыми Руководствами по КОР называется струевыми пламенами. При загорании вытекающих из отверстий в емкостном или линейном оборудовании паровых (газовых) струй они будут сгорать в виде факелов, являясь источником теплового излучения. Под действием ветрового напора оси факелов могут наклоняться, увеличивая интенсивность теплового потока с подветренной стороны.

Аналогично моделированию поражающих факторов в случае пламени горящего пролива, для факела используются либо твердотельная, либо точечная аппроксимация. В первом случае постулируется, что тепло излучает исключительно поверхность факела, имитируемого конусом (либо усеченным конусом, либо цилиндром), во втором – совокупность точечных излучающих центров, расположенных на оси факела.

Целевой метрикой данного сценария аварии также естественно считать интенсивность падающего на объект-мишень теплового потока.

Нормативная методика МЧС РФ [61] рассматривает случай факельного горения сжатых газов, горючих жидкостей и их паров при истечении под давлением. Для расчета длины пламени (факела)  $L_{\text{пл}}$ , м, при горении струи предложена зависимость

$$L_{\text{ф}} = K_{\text{ф}} \cdot G_{\text{выб}}^{0.4}, \quad (2.72)$$

где  $G_{\text{выб}}$  – массовый расход флюида через отверстие, кг/с;

$K_{\text{ф}}$  – эмпирический коэффициент, величина которого для случая истечения паров равна 15.

Расчетные соотношения для величины  $G_{\text{выб}}$  различаются в зависимости от того, является ли истечение докритическим, или сверхкритическим. Изменение длины факела и уг-

ла его наклона к горизонту под действием ветра для струйного пламени [61] не учитывается. О принятой форме факела ничего не сказано, но из того, что предложено рассчитать только один поперечный размер (ширину), следует заключить, что форма факела аппроксимируется цилиндром. Диаметр (ширину) факела  $d_\phi$ , м, в [61] задан соотношением:

$$d_\phi = 0.15 \cdot L_\phi. \quad (2.73)$$

Для расчета интенсивности падающего теплового потока предложено использовать методологию, изложенную нами выше в разделе, посвященном горению пролива. Следует отметить, что, в отличие от случая пожара пролива, влияние скорости ветра на длину и наклон пламени не учитывается. Таким образом, она более всего подходит для случаев горения скоростных парогазовых струй.

Для определения светимости (среднеповерхностной плотности) теплового излучения факела  $E_f$  рекомендован тот же метод, что и для пламени горения пролива, в затруднительных случаях рекомендована консервативная оценка  $E_f = 200 \text{ кВт/м}^2$ .

Укажем, что, согласно общепринятому подходу (например, Lee's Loss Prevention [193], или приложение 6.1 CPR-14E [148]), геометрический фактор видности  $F_{q1}$  в случае излучающего вертикального цилиндра длиной  $L$ , приподнятого на высоту  $\Delta z$  относительно объекта-мишени, расположенного на расстоянии  $X$  от оси факела, рассчитывается по формулам, модифицированным относительно "неприподнятого" цилиндра:

$$\begin{aligned} X_1 &= X, \text{ м}; & L_1 &= L + \Delta z, \text{ м}; & F_{v1} &= F_v(L_1) - F_v(L); \\ F_{h1} &= F_h(L_1) - F_h(L); & F_{q1} &= \sqrt{F_{v1}^2 + F_{h1}^2} \end{aligned} \quad (2.74)$$

Однако нормативная методика МЧС РФ [61] данный эффект ( $\Delta z \neq 0$ ) игнорирует.

### 2.5.6 Поражающие факторы сценария "Объемный взрыв паров"

Параметры объемного взрыва ТВС с развитием избыточного давления зависят от характеристик пространства, в котором он происходит (степени его "загроможденности"). Принято классифицировать несколько режимов сгорания топливовоздушной смеси в открытой атмосфере, спектр которых довольно широк – от относительно медленного сгорания без развития какого-либо заметного избыточного давления (режим "пожара-вспышки"), до детонационного режима со сверхзвуковой скоростью движения фронта пламени и амплитудой избыточного давления, достигающей 1.4 МПа. При этом максимальное избыточное давление дефлаграционного сгорания ТВС составляет примерно 0.1 МПа.

Двумя "целевыми метриками" рассматриваемого сценария аварии являются избыточное давление и импульс положительной фазы взрыва.

Суть подхода Руководства по КОР [61] к моделированию объемных взрывов ТВС заключается в том, что:

1) принята беспороговая модель, т.е. считается, что объемный взрыв облака ТВС с "опасной" концентрацией паров возможен всегда, независимо от его массы;

2) топливовоздушная смесь рассматривается как неподвижное однородное тело цилиндрической формы с отношением высоты к радиусу 1:30, не имеющее внутренней структуры (в качестве границы облака принята изоповерхность точек с концентрацией 1.0 НКПР). Для оценки массы горючего вещества, находящегося в области ТВС с концентрацией от НКПР до ВКПР, предложено полную массу вещества в облаке умножить на коэффициент участия во взрыве  $Z$ ;

3) горючие вещества, участвующие в крупнотоннажном хозяйственном обороте и способные в результате аварии образовать облако ТВС, по своей чувствительности к возбуждению взрывных процессов разделены на четыре класса. В связи с этим участвующее во взрыве вещество следует отнести к одному из классов по таблице ПЗ.1 [61];

4) область пространства, которая в рассматриваемой аварии предположительно будет занята облаком ТВС, с учетом его загроможденности, экспертно должна быть отнесена к одному из четырех классов по п.15 Приложения 3 [61];

5) с помощью экспертной таблицы ПЗ.3 [61], отнесением к одному из шести режимов: одному детонационному и пяти дефлаграционным, различающимся видимой скоростью движения фронта пламени  $u_{фр}$ , идентифицируется ожидаемый (т.е. наиболее вероятный) тип взрывного сгорания ТВС;

6) независимо от дислокации источника зажигания эпицентр взрыва считается совпадающим с центром основания цилиндра, поэтому взрыв рассматривается как осесимметричный.

Формулы для расчета энергетического потенциала взрыва  $E_{eff}$ , Дж, различаются в зависимости от соотношения между средней концентрацией вещества в облаке и его стехиометрической концентрации в смеси в воздухе:

$$E_{eff} = \begin{cases} m_2 \cdot \Delta H_c, & \text{если } C_{II} \leq C_{стx} \\ m_2 \cdot \Delta H_c \cdot \frac{C_{стx}}{C_{II}}, & \text{если } C_{II} > C_{стx} \end{cases}, \quad (2.75)$$

где  $m_2$  – масса горючего вещества, находящегося в той части ТВС, где концентрация его паров находится в диапазоне НКПР ÷ ВКПР, кг,  $m_2 = m_{II} \cdot Z$ . В общем случае коэффициент

участия вещества во взрыве  $Z$  рекомендовано считать равным 0.1;

$C_{\text{п}}$  – концентрация газа/пара в паровоздушной смеси, об. %;

$C_{\text{стх}}$  – стехиометрическая концентрация флюида в смеси с воздухом, об. %.

В случае расположения облака на поверхности земли полученную величину  $E_{\text{eff}}$  рекомендуется удвоить.

Далее согласно нормативной методике [61] рассчитываются:

а) безразмерное расстояние Сакса  $\bar{R}$ , [214], от эпицентра взрыва до объекта-мишени

$$\bar{R} = R \cdot \sqrt[3]{\frac{P_0}{E_{\text{eff}}}}, \quad (2.76)$$

где  $R$  – расстояние от эпицентра взрыва до объекта-мишени, м;

б) безразмерное избыточное давление  $\bar{P}$  взрыва (для режимов 2 ÷ 6):

$$\bar{P} = \left( \frac{u_{\text{фр}}}{u_{\text{зв}}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sigma_p - 1}{\sigma_p} \right) \cdot \left( \frac{0.83}{\bar{R}} - \frac{0.14}{\bar{R}^2} \right), \quad (2.77)$$

где  $u_{\text{фр}}$  – видимая скорость фронта пламени, м/с. В качестве  $u_{\text{фр}}$  для режимов 2 –4 взрывного превращения принимается наибольшая из двух величин: приведенной в п.16 [61], или рассчитанной по формуле

$$u_{\text{фр}} = k_1 \cdot m_{\text{п}}^{1/6}. \quad (2.78)$$

Для режимов 5 и 6 величина  $u_{\text{фр}}$  рассчитывается по (2.78), при этом для пятого режима коэффициент  $k_1 = 43$ , шестого –  $k_1 = 26$ ;

$\sigma_p$  – степень расширения продуктов сгорания газопаровоздушных смесей, которую допускается принимать равной 7;

в) безразмерный импульс  $\bar{I}$  фазы сжатия взрыва (для режимов 2 ÷ 6):

$$\bar{I} = W \cdot (1 - 0.4 \cdot W) \cdot \left( \frac{0.06}{\bar{R}} + \frac{0.01}{\bar{R}^2} - \frac{0.0025}{\bar{R}^3} \right); \quad (2.79)$$

где вспомогательный параметр

$$W = \frac{u_{\text{фр}}}{u_{\text{зв}}} \cdot \left( \frac{\sigma_p - 1}{\sigma_p} \right). \quad (2.80)$$

Область расстояний от эпицентра взрыва, в которой применимы соотношения (2.79) и (2.80) определены неравенством  $\bar{R} > 0.34$ , в ближней зоне взрыва эти соотношения следует применять с заменой  $\bar{R} \rightarrow \bar{R}_{\text{кр}} = 0.34$ ;

г) размерное избыточное давление воздушной взрывной волны (ВВВ):

$$\Delta P = \bar{P} \cdot P_0; \quad (2.81)$$

д) размерный импульс фазы сжатия ВВВ:

$$I^+ = \frac{\bar{I} \cdot P_0^{2/3} \cdot E_{\text{eff}}^{1/3}}{u_{\text{зв}}}. \quad (2.82)$$

Подход Руководства по безопасности [90] к расчету параметров воздушных взрывных волн отличается от подхода МЧС России [61] тем, что, наряду с наиболее вероятным дефлаграционным режимом сгорания ТВС, в нем предложено дополнительно рассчитывать избыточное давление  $\Delta P_{\text{дт}}$  и импульс фазы сжатия  $I_{\text{дт}}$  ВВВ для детонационного режима его сгорания.

Для этого рекомендовано вычислить безразмерные величины:

а) избыточного давления:

$$\ln \bar{P}_{\text{дт}} = -1.124 - 1.66 \cdot \ln \bar{R} + 0.26 \cdot (\ln \bar{R})^2; \quad (2.83)$$

б) импульса фазы сжатия:

$$\ln \bar{I}_{\text{дт}} = -3.4217 - 0.898 \cdot \ln \bar{R} - 0.009 \cdot (\ln \bar{R})^2. \quad (2.84)$$

После выполнения всех расчетов в качестве итоговых величин безразмерного давления и импульса достаточно нетрадиционно предложено принимать наименьшие значения, соответствующие дефлаграционному и детонационному режимам:

$$\bar{P}_x = \min(\bar{P}, \bar{P}_{\text{дт}}); \quad \bar{I}_x = \min(\bar{I}, \bar{I}_{\text{дт}}). \quad (2.85)$$

Размерные давление и импульс фазы сжатия ВВВ рассчитываются по (2.81) и (2.82).

### 2.5.7 Поражающие факторы сценария "Пожар-вспышка"

Статистика аварий, связанных с образованием в атмосфере облаков ТВС показывает, что в большей части случаев при наличии источников зажигания с подходящей энергией наблюдается относительно спокойное сгорание этих горючих смесей, практически не сопровождающееся образованием волны избыточного давления. Для таких режимов ламинарного горения характерна скорость распространения пламени  $5 \div 30$  м/с. Подобный режим сгорания получил специальное название *пожар-вспышка* (flash fire). В литературе отмечается, что сгорание ТВС в атмосфере всегда начинается в таком режиме и лишь в последующем, при наличии условий для турбулизации пламени, скорость его фронта и амплитуда давления возрастают.

Целевая метрика данного сценария – размер зоны, занятой горячими продуктами сгорания ТВС. Поражающий фактор пожара-вспышки обусловлен воздействием на людей и другие объекты высокотемпературных продуктов сгорания ТВС. Радиус зоны поражения пожара-вспышки  $R_{пв}$  может быть рассчитан по формуле:

$$R_{пв} = 1.2 \cdot R_{НКПР}, \quad (2.86)$$

где  $R_{НКПР}$  – горизонтальный радиус (в оригинале – размер) взрывоопасной зоны.

В случае облака ТВС по [61]:

$$R_{НКПР} = 7.8 \cdot \left( \frac{m_{п}}{\rho_{п}(T) \cdot C_{НКПР}} \right)^{0.33}, \quad (2.87)$$

где  $m_{п}$  – общая масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время испарения, кг;

$\rho_{п}(T)$  – плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре  $T$ , кг/м<sup>3</sup>.

### 2.5.8 Параметры облака ТВС, дрейфующего под действием ветра

В отсутствии источника зажигания и при наличии ветра (скорость которого превышает 0.25 м/с) паровоздушное облако начнет дрейфовать в направлении ветрового потока. В процессе такого дрейфа вследствие турбулентной диффузии, гравитационного растекания и подмешивания воздуха объем облака ТВС будет постепенно увеличиваться, а концентрация паров горючего вещества, напротив, убывать. Если до момента уменьшения концентрации паров ниже НКПР в области, занимаемой облаком, появится "подходящий" источник зажигания, ТВС сгорит, либо с развитием избыточного давления, либо в режиме пожара-вспышки. В противном случае продолжится дрейф облака ТВС вплоть до полного его рассеивания в атмосфере без каких-либо взрывопожарных последствий.

С теоретической точки зрения при прогнозе различных сценариев развития аварии, чреватых наличием аварийного риска, математическое моделирование сценария распространения (адвекции и рассеивания) ТВС в открытой атмосфере является одним из самых сложных. Параметры дрейфующего облака ТВС, как ни при каком ином сценарии аварии, сильно зависит от состояния атмосферы – ее термической устойчивости, изменения скорости ветра с высотой и т.д.

Наряду с характеристиками атмосферы, к числу прочих определяющих параметров задачи относятся:

а) свойства поступающего в атмосферу пара/газа – фазовое состояние, плотность,

температура, теплоемкость и др. В зависимости от фактора плавучести при моделировании дрейфа различают поведение в атмосфере облаков:

- всплывающих (легкого газа);
- с нейтральной плавучестью;
- с плотностью, превышающей плотность воздуха (тяжелого газа);

б) тип источника выброса, относящийся к одному из трех классов:

- мгновенный;
- продолжительный с примерно постоянной мощностью;
- с переменной мощностью.

Целевой метрикой данного сценария аварии является пространственное поле концентрации горючего вещества (пара или газа) внутри облака ТВС, поскольку именно концентрация позволит прогнозировать параметры взрыва. Причем речь всегда идет об осредненной концентрации, как экспериментальной, так и расчетной. Не следует забывать, что с учетом характера атмосферной турбулентности принципиальное значение имеет четкое указание на период осреднения. В условиях открытой атмосферы в силу существования длиннопериодных волн говорить об устойчивости средних значений даже за длительный период наблюдений можно лишь условно. Уместно вспомнить, что рекомендуемый CPR-18E [150] период осреднения в рамках КОР равен 20 с.

Для прогноза рассеивания выбросов в атмосфере из-за своей простоты наиболее популярны математические модели гауссова типа. Однако эти модели имеют очень ограниченное применение в следующих случаях:

- рассеивание тяжелого газа на начальной стадии, пока плотность ТВС не приблизится к плотности атмосферного воздуха;
- рассеивание облака в штилевых условиях.

При учете орографии местности гауссовы модели неспособны сделать это в принципе. Не следует забывать, что большая часть экспериментальных исследований (в натуре или аэродинамических трубах), выполненных с целью верификации дисперсионных математических моделей, проводилась в условиях плоскойстилающей поверхности.

Между тем производственные аварии, что называется, по определению, происходят в условиях промышленной застройки, для которой характерна большая плотность разновысотных зданий и сооружений. Очень грубо наличие препятствий для дрейфующего по ветру облака можно задать с помощью величины шероховатости поверхности. Однако с позиции метода *multy-energy*, реализованного в "желтой книге" TNO CPR-14E [148], для прогноза параметров объемных взрывов важна именно микроструктура поля концентраций горючего вещества (с разрешением порядка минимального расстояния между препятствиями  $D_1$ ).

Как показывает опыт, рассеивание облака в атмосфере определяется характером ее турбулентности, который, в свою очередь, зависит от двух обстоятельств:

- термической стратификации атмосферного воздуха;
- шероховатости подстилающей поверхности.

Первый фактор можно количественно охарактеризовать масштабом Монина-Обухова  $L$ , м, второй – высотой слоя шероховатости  $z_0$ , м. Разработано немало способов расчета параметра  $L$ . Например, чтобы рассчитать  $L$  по стандартным метеоданным, надо знать:

- балл облачности  $N$ ;
- скорость ветра на высоте флюгера  $u_w$ ;
- температуру воздуха на высоте  $z_T$  (2 м);
- высоту слоя шероховатости  $z_0$ ;
- высоту стояния солнца  $\chi$ ;
- температуру  $T_w$  влажного термометра на высоте  $z_T$  (ночью).

Наибольшей популярностью пользуется способ расчета параметра  $L$  по классу устойчивости атмосферы Паскуилла и высоте слоя шероховатости  $z_0$ . Он доступен, например, в [148] в виде серии номограмм.

Нормативная методика МЧС России [61] не рассматривает возможность дрейфа облака паров ЛВЖ под действием ветрового напора.

Модель рассеивания "тяжелого" газа, использованная в Руководстве по безопасности [89], реализована ЗАО "НТЦ "Исследование проблем промышленной безопасности" в виде компьютерного кода как программный комплекс "Токси+Риск". К сожалению, в настоящее время данный программный комплекс может выполнять расчеты только в "точечной" постановке, интервальные вычисления им не поддерживаются.

Из теории атмосферной турбулентности следует, что рассеивание примеси в атмосфере в заданном месте (высота слоя шероховатости  $z_0$  известна) будет в сильной степени зависеть от метеоусловий на момент аварии: инсоляции, скорости ветра и влажности воздуха (ночью). Эти параметры, как правило, значительно меняются даже в течение одних суток.

Аналитических моделей для расчета поля концентраций, создаваемого продолжительным источником выброса тяжелого газа, в зарубежных Руководствах по КОР нам обнаружить не удалось. Большая часть имеющихся физико-математических моделей предполагает решение систем дифференциальных уравнений в частных производных либо в полной трехмерной постановке, либо в упрощенном одномерном случае (SLAB-модель). Эти модели реализованы в виде коммерческих компьютерных кодов, к сожалению, недоступных.

В этой связи опишем боксовую модель Бриттера-МакКвайда [141], построенную на анализе размерностей. Хотя эта упрощенная модель не учитывает класс устойчивости атмосферы, по утверждению [173], полученные с ее помощью прогнозы часто превосходят по точности результаты расчета по физически более содержательным моделям. Модель Бриттера и МакКвайда предназначена для прогноза зависимости габаритов факела от расстояния по оси ветра.

Модель требует задания следующих исходных параметров: первоначального объема облака  $V_0$ , м<sup>3</sup> (объемного расхода струи  $W_0$ , м<sup>3</sup>/с), начальной плотности газа в облаке (струе)  $\rho_{п}$ , кг/м<sup>3</sup>, плотности воздуха  $\rho_{в}$ , кг/м<sup>3</sup>, продолжительности выброса  $t_{\text{выб}}$ , с, скорости ветра  $u_w$ , м/с.

Далее вычисляются:

а) параметр плавучести  $g_0$ :

$$g_0 = g \cdot \frac{\rho_{п} - \rho_{в}}{\rho_{в}}, \quad (2.88)$$

б) характерная длина струи для продолжительного выброса  $L_j$ , м:

$$L_j = \sqrt{\frac{W_0}{u_w}}. \quad (2.89)$$

Аналогом  $L_j$  для случая мгновенного выброса является параметр  $D_c$ , м:

$$D_c = \sqrt[3]{V_0}. \quad (2.90)$$

В модели приведены номограммы, которые могут быть использованы при условии, что безразмерная плотность ТВС в облаке  $\bar{\rho}_{\text{ТВС}}$  превышает пороговые значения:

а) для мгновенного выброса 
$$\bar{\rho}_{\text{ТВС}} = \frac{\sqrt{g_0 \cdot V_0}}{u_w \cdot D_c} \geq 0.2; \quad (2.91-1)$$

б) продолжительного выброса 
$$\bar{\rho}_{\text{ТВС}} = \sqrt[3]{\frac{g_0 \cdot W_0}{u_w^3 \cdot L_j}} \geq 0.15. \quad (2.92-2)$$

Мгновенный выброс от продолжительного следует отличать по величине безразмерного параметра

$$\beta_{\text{ВМ}} = \frac{u_w \cdot t_{\text{выб}}}{X}, \quad (2.93)$$

где  $X$  – расстояние от источника для расчетной точки, м.

Если  $\beta_{\text{ВМ}} \geq 2.5$ , тогда рассеивание облака тяжелого газа следует оценивать по модели продолжительного источника, если  $\beta_{\text{ВМ}} \leq 0.6$ , то – мгновенного. Если  $\beta_{\text{ВМ}} \in ]0.6, 2.5[$  – рекомендовано использовать обе модели и взять наименьшее значение.

Номограмма для мгновенного выброса представлена на рисунке 2.2. Она разработана Бриттером и МакКвайдом на основании собственных экспериментальных данных, полученных ими при измерениях, как в натуре, так и в аэродинамических трубах. Заявленная область применимости модели составляет  $0.7 < \sqrt{\frac{g_0 \cdot D_c}{u_w^2}} < 10$ .

Следует подчеркнуть, что в случае мгновенного выброса речь идет о "мгновенных" концентрациях, период осреднения при измерениях которых составлял 0.6 с.

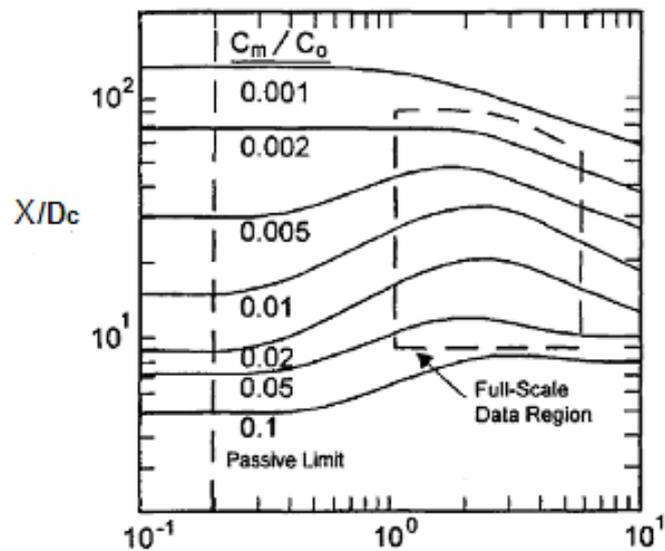


Рисунок 2.2 – Номограмма для определения расстояния в безразмерном виде ( $X/D_c$ ) до точки с максимальной концентрацией  $c_{\text{max}}$  (в долях от  $c_0$ ) в зависимости от безразмерного параметра  $(g_0 \cdot D_c / u_w^2)^{1/2}$

По данным Бриттера и МакКвайда радиус облака  $b(t)$  вследствие диффузии увеличивается со временем по зависимости

$$b(t) = \sqrt{b_0^2 + 1.2 \cdot t \cdot \sqrt{g_0 \cdot V_0}}, \quad (2.94)$$

где  $b_0$  – начальный радиус облака (принимаемый равным радиусу пролива), м; а средняя скорость адвекции облака составляет  $0.4 \cdot u_w$ . Кроме того, модель позволяет оценить среднюю высоту облака ГВС как функцию времени

$$b_z(t) = \frac{c_0}{c_{\text{max}}(t)} \cdot \frac{V_0}{\pi \cdot b^2(t)}. \quad (2.95)$$

Аналогичная номограмма для продолжительного выброса приведена на рисунке 2.3.

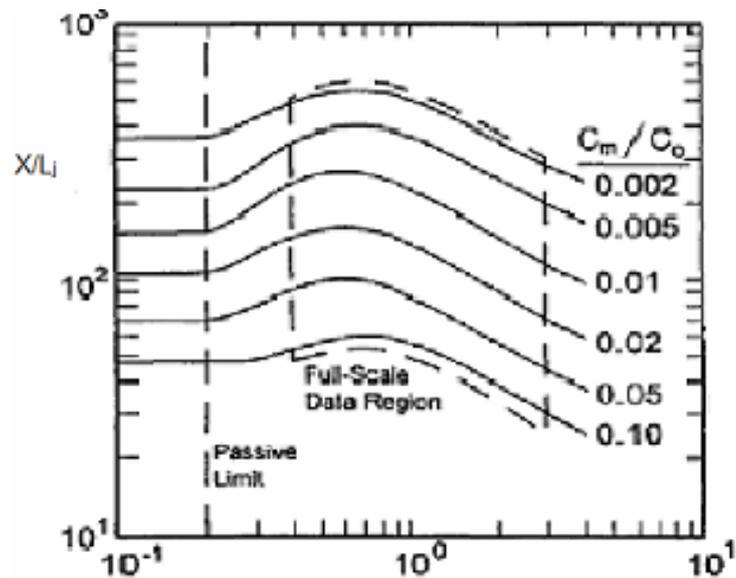


Рисунок 2.3 – Номограмма для определения расстояния в безразмерном виде  $X/L_j$  до точки с концентрацией  $c_{\max}$  (в долях от  $c_0$ ) в зависимости от безразмерного параметра  $(g_0^2 \cdot W_0 / u_w^5)^{1/5}$

Область применимости данной разновидности модели указана как  $0 < \left( \frac{g_0^2 \cdot W_0}{u_w^5} \right)^{1/5} < 4$ . Важно отметить, что в случае продолжительного выброса модель предсказывает концентрации, осредненные за 10 минут. Утверждается, что при использовании меньшего времени осреднения значения концентрации увеличиваются в 1.6 раза. Для выброса данного типа модель Бриттера и МакКвайда позволяет рассчитать зависимость от расстояния по оси факела в горизонтальном направлении:

а) половины поперечного размера струи:

$$b(X) = 2 \cdot b_0 + 8 \cdot L_b + 2.5 \cdot L_b^{1/3} \cdot X^{2/3}, \quad (2.96)$$

где  $L_b$  – параметр, имеющий размерность длины:

$$L_b = \frac{W_0 \cdot g_0}{u_w^3}; \quad (2.97)$$

б) уширение струи в вертикальном направлении:

$$b_z(X) = \frac{W_0}{2 \cdot u_w \cdot b(X)}. \quad (2.98)$$

В качестве значения "граничной" концентрации в факеле в направлении поперек ветра

Бриттер и МакКвайд приняли то же значение, которое ранее было использовано для определения безопасного расстояния по оси факела. Горизонтальная проекция факела в модели Бриттера-МакКвайда изображена на рисунке 2.4:

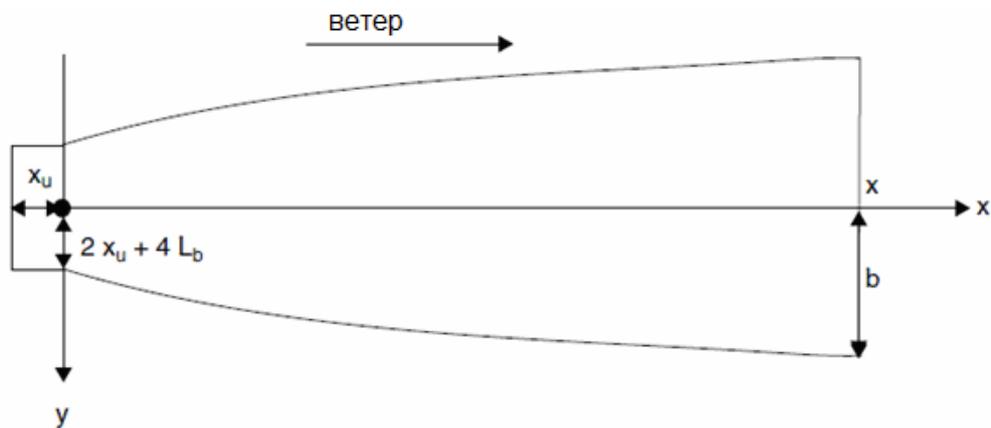


Рисунок 2.4 – Параметры горизонтальной проекции факела, образующегося в атмосфере при выбросе из продолжительного источника по модели Бриттера-МакКвайда

Известно, что при рассеивании примесей в атмосфере габариты факела (как поперечные, так и вертикальные), принятые по некоторому "референтному" значению концентрации, по мере удаления от источника вдоль оси достигают максимума на каком-то расстоянии от него, а затем вновь уменьшаются до нуля.

Отметим, что данный метод не позволяет оценить массу горючего вещества в облаке, способного сгорать (взрываться), что делает невозможным оценку поражающих факторов объемного взрыва облака ТВС.

### 2.5.9 Параметры физического взрыва сосуда под давлением

При разрушении сосуда внутренним давлением образуется воздушная волна сжатия (ВВС), взрыв сопровождается разлетом осколков оболочки. Параметры этих двух поражающих факторов и являются целевыми метриками данного сценария аварии.

СТО Газпром 2-2.3-400-2009 [107] для оценки параметров ВВС предлагает воспользоваться моделью, разработанной акад. М.А.Садовским:

а) избыточное давление взрыва во фронте ВВС, кПа:

$$\Delta P = 1000 \cdot \left( \frac{0.084}{\bar{R}} + \frac{0.27}{\bar{R}^2} + \frac{0.7}{\bar{R}^3} \right), \quad (2.99)$$

справедливой для безразмерных расстояний  $\bar{R} > 0.25$ , которые, в свою очередь, рассчитываются для расстояний  $X$  от центра взрыва до исследуемой точки, м, по формуле

$$\bar{R} = \frac{X}{m_{\text{ТНТ}}^{1/3}}, \quad (2.100)$$

где тротиловый эквивалент взрыва  $m_{\text{ТНТ}} = 4.5 \cdot 10^{-7} \cdot A_{\text{г}} \cdot m_{\text{г}};$  (2.101)

$A_{\text{г}}$  – работа расширения единицы массы газа, Дж/кг;

$m_{\text{г}}$  – масса газа в сосуде, кг;

б) положительный импульс взрыва, Па·с:

$$I^+ \cong 400 \cdot \frac{m_{\text{ТНТ}}^{2/3}}{X}. \quad (2.102)$$

Подходы к оценке скорости разлета осколков при разрушении сосуда под давлением, описаны выше, в разделе 2.5.3, посвященному сценарию BLEVE.

### 2.5.10 Источники неопределенности при оценке величины целевых метрик сценариев аварии

Подводя итоги анализа неопределенности третьего этапа процедуры КОР, следует констатировать, что он изобилует источниками неопределенности всех типов. Намеренно игнорируя имеющуюся альтернативность моделирования поражающих факторов аварии различными Руководствами по КОР, назовем следующие источники неопределенности данного этапа процедуры:

#### 1 Терминологического типа:

- различные толкования понятия "длина пламени", обуславливающие различия ее величины до трех раз, [54]. Это связано с тем, что в качестве границы пламени принимается граница области: а) светящейся в видимом диапазоне; б) эффективно излучающей в инфракрасном диапазоне;
- нечеткое определение понятия "среднеповерхностная плотность теплового излучения", не указывающее на учет/неучет излучений оптического диапазона;
- отсутствие ясного определения, что под скоростью ветра понимается средняя скорость ветра на "высоте флюгера" 10 м с указанием периода осреднения, [54];
- отсутствие толкования понятия "скорость воздушного потока над поверхностью пролива", поскольку непосредственно над поверхностью (в слое шероховатости) скорость потока по определению равна нулю;
- отсутствие четкого определения понятий "диаметр" и "время жизни" огненного шара;

- трактовка Руководствами по КОР [90], [93] поражающего фактора при объемных взрывах ТВС в открытой атмосфере как *ударной* волны. Отметим, что *ударной* волной обычно обозначают особые воздушные взрывные волны, возникающие при взрывах детонационного типа. Это волны с крутым фронтом и относительно малой длительностью. У взрывных волн, образующихся при сгорании облака ТВС в дефлаграционном режиме, избыточное давление нарастает медленно, их продолжительность больше, поэтому правильнее их называть *воздушными взрывными волнами*.

## 2 Модельного типа:

### 2.1 сценарной:

- отсутствие указаний на невозможность реализации BLEVE на резервуарах типа РВС. Дело в том, что прочность резервуаров с вертикальными стенками на разрушение внутренним давлением (2 – 3 кПа) многократно меньше, чем резервуаров типа РГС (50 – 70 кПа), поэтому в них соответствующие для BLEVE условия не могут сложиться. Имеющаяся статистика аварий подтверждает это;

- выбор сценария аварии, связанного со сгоранием облака ТВС: а) либо без развития избыточного давления (в режиме *пожара-вспышки*); б) либо с избыточным давлением в одном из шести режимов взрывного превращения. Определяемый по экспертной таблице ПЗ.3 [61] режим сгорания является лишь *наиболее* вероятным, при этом вероятность прочих режимов не равняется нулю;

### 2.2 концептуальной:

- моделирование пламени пожара: а) точкой; б) твердым телом с излучением тепла исключительно поверхностью; в) объемным излучателем;

- моделирование испарения жидкости из пролива на основе механизма молекулярной или турбулентной диффузии в атмосфере;

- учет/неучет при оценке энергетического потенциала области ТВС, концентрация горючего вещества в которой превышает ВКПР;

- моделирование распространения облака ТВС в турбулентной атмосфере на основании:

- к-ε теории турбулентной диффузии;
- моделей гауссова типа;
- боксовых моделей;

### 2.3 аппроксимационной:

- учет/неучет при расчете ослабления теплового потока в атмосфере влажности воздуха и содержания углекислого газа;

- учет/неучет эффекта удлинения основания пламени пролива под действием ветра;

- аппроксимация формы пламени (пожара пролива, факела) цилиндром, конусом, усеченным конусом;
- задание доли тепла, расходуемой на излучение константой или параметром, зависящим от скорости истечения;
- задание среднеповерхностной плотности теплового излучения факела константой или функцией;
- учет/неучет эффекта влияния скорости ветра на длину факела и отклонение его оси;
- учет/неучет эффекта всплывания факела под действием сил плавучести.

## **2.6 Неопределенность оценки ущерба в натуральном выражении от воздействия поражающих факторов аварии на людей, имущество и компоненты природной среды**

Четвертый этап КОР предполагает оценку: а) величины прогнозируемого ущерба от аварии в натуральном выражении; и б) условной вероятности его причинения. Действующие Руководства по КОР рассматривают следующие виды ущерба от аварий:

1) гуманитарный ущерб (поражение людей), при воздействии:

а) пламени (пожара пролива, факельного горения) и горячих продуктов сгорания ТВС (пожар-вспышка) – летальный исход;

б) теплового излучения пожара пролива, факельного горения струи горючих газов или паров, огненного шара – гибель, ожоги различной степени;

в) воздушной взрывной волны при объемных взрывах ТВС и внутренних взрывах в здании – гибель, барические и механические травмы;

г) летящих осколков и обломков, разбрасываемых при взрыве – летальный исход, травмирование. Поскольку масса такого обломка обычно велика (не менее 1 кг), его попадание в человека, как правило, заканчивается гибелью последнего;

2) материальный ущерб (повреждение различной степени зданий и сооружений, материалов, транспортных средств):

а) в результате возгорания стационарных и подвижных объектов: а) при контакте с пламенем; б) вследствие нагревания тепловым излучением (пожара пролива, факельного горения струи горючих газов или паров, огненного шара);

б) при падении на них воздушной взрывной волны;

в) при ударе осколков и обломков, разлетающихся при взрыве. Можно считать, что попадание тяжелого летящего обломка в подавляющем большинстве случаев заканчивается разрушением здания или сооружения;

3) экологический ущерб – это ущерб, вызываемый: а) загрязнением природных сред (атмосферы, водных объектов, почв) опасными веществами, выбрасываемыми в результа-

те аварии и продуктами их сгорания; б) их деградацией вследствие аварии.

К особому типу эффектов воздействия поражающих факторов следует отнести эскалацию аварии по каскадному механизму (эффект "домино"), когда поражающие факторы взрыва (пожара) на одном ВПОО (или его составляющей), порождают аварии на соседних объектах. В результате подобной эскалации аварии масштаб ущерба многократно возрастает.

Все источники неопределенности при оценке ущерба можно отнести к двум типам:

1) *качественного типа*. Неопределенность этого типа возникает, например, при игнорировании какого-либо фактора (например, защитного действия негорючей одежды или укрытий), либо вследствие слишком грубых подходов к оценке ущерба (например, при прогнозировании только летальных исходов без учета возможности получения людьми ожогов или ран), либо игнорировании некоторых составляющих полного аварийного ущерба;

2) *количественного типа*. К источникам неопределенности количественного типа следует отнести вид расчетных соотношений, используемых для прогнозирования ущерба взрывов/пожаров (аварий), а также величину их коэффициентов.

### **2.6.1 Методы оценки ущерба от воздействия пламени, продуктов горения и потока теплового излучения**

В Руководствах по КОР принято положение, что люди, попавшие в область прямого контакта с пламенем (пожара пролива, факельного горения, пожара-вспышки), погибают, т.е. летальность в данном случае равна 100%. При относительно продолжительном нахождении имущества в зоне огня (хотя это явно и не оговорено в Руководствах по КОР), оно полностью теряет свои потребительские свойства. Вопрос об оценке материального ущерба при пожаре-вспышке пока остается открытым.

Руководство по безопасности [93] допускает как детерминированный, так и вероятностный способ оценки поражения людей и различного оборудования потоком теплового излучения. Детерминированный способ основан на "дозном" подходе, при котором в качестве критерия поражения рассматривается удельная доза падающего теплового потока  $D$ , кДж/м<sup>2</sup> (таблица 2.10). Анализ данной таблицы показывает, что неопределенность детерминированного подхода велика, поскольку он: а) малоинформативен; б) не учитывает характеристик одежды, имеющейся на человеке. Между тем при учете защитных свойств одежды обычно принимают, [149], что 50% падающей энергии отражается, 20% – поглощается одеждой и только 30% проходит.

Согласно экспериментальным данным, воспламенение любого вида одежды происходит позже, чем появление ожога III степени на незащищенной коже.

Таблица 2.10 – *Детерминированные критерии поражения людей тепловым излучением*

Вид ущерба для человека	Интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м <sup>2</sup>	Удельная доза падающего теплового потока D, кДж/м <sup>2</sup>
Ожог первой степени	7.0	[105, 140]
	10.5	[63, 84]
Ожог второй степени	7.0	[210, 280]
	10.5	[126, 168]

В CPR-16E [149] приведена таблица 4.1 для 20-ти видов тканей различного состава и расцветок, в которой отражены температуры воспламенения, коэффициенты отражения и другие их свойства. Для детерминированного прогноза степени повреждения  $k_{\text{повр}}$  оборудования предложены соотношения:

$$k_{\text{повр}} = \begin{cases} 0 & \text{при } q_{\text{об}} < 12 \text{ кВт/м}^2 \\ 0.1, & \text{при } D_{\text{об}} \leq D_{\text{пор}} \\ 0.1 + 0.9 \cdot \frac{D_{\text{об}} - D_{\text{пор}}}{D_{\text{гиб}} - D_{\text{пор}}}, & \text{при } D_{\text{пор}} < D_{\text{об}} < D_{\text{гиб}} \\ 1, & \text{при } D_{\text{об}} > D_{\text{гиб}} \end{cases} \quad (2.103)$$

Некоторая дополнительная неопределенность в данном случае содержится в разной трактовке интенсивности теплового потока – если в случае технологического оборудования [93] четко говорит о *поглощенной* дозе инфракрасной радиации, то при воздействии на человека такого уточнения нет. Между тем коэффициенты поглощения (степень черноты) внешних поверхностей оборудования в инфракрасной области необязательно близки к 1,0 (для обычных конструкционных материалов в качестве грубой оценки коэффициента поглощения CPR-16E [149] рекомендует принять 0.7).

Таблица 2.11 – *Детерминированные критерии  $D_{\text{пор}}$  и  $D_{\text{гиб}}$  для оборудования разных классов чувствительности к воздействию теплового излучения*

Класс чувствительности оборудования	Тип оборудования	$D_{\text{пор}}$ , кДж/м <sup>2</sup>	$D_{\text{гиб}}$ , кДж/м <sup>2</sup>
I (высокочувствительное)	Расположенное вне укрытий сложное технологическое оборудование	3300	10000
II (среднечувствительное)	Оборудование в блок-контейнерах или индивидуальных укрытиях. Незащищенные крановые узлы и другое незащищенное технологическое оборудование с фланцевыми соединениями с чувствительными к нагреву материалами	8300	25000
III (слабочувствительное)	Наземные трубопроводы, крановые узлы в защитном укрытии	35000	45000

Укажем, что отечественные Руководства по КОР [93], [61] не содержат методов оценки экологического ущерба, вызываемого тепловым излучением. При этом детерминированные критерии воздействия теплового потока горячей струи сжатого метана на компоненты природной среды при авариях имеются в отраслевом стандарте [107]:

Таблица 2.12 – *Критические значения теплового потока\*, соответствующие уничтожению плодородного слоя почв и растительности, [107]*

Компонент природной среды	$q_{кр}$ , кВт/м <sup>2</sup>
Древесная растительность	7
Почвы	35
Лесная подстилка	5
Сельскохозяйственные культуры	5
* <i>Примечание <math>q_{кр}</math> – тепловой поток, рассчитанный на 90-ю секунду после начала аварийного истечения газа (продолжительность экспозиции не указана)</i>	

Вероятностный подход к прогнозированию поражения человека тепловым излучением в [61], [93] изложен только для летального исхода. Данный подход использует так называемые пробит-функции Pr, впервые предложенные Финни (Finney), [162]. Он пригоден для описания отклика объекта на воздействие любого фактора случайной природы, если этот эффект подчиняется нормальному распределению вероятности, [173].

В наиболее общем случае вероятность отклика P может быть найдена по известной величине Pr по соотношению

$$P(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \cdot du, \quad (2.104)$$

где u – переменная интегрирования.

Величина Pr имеет нормальное распределение со средним значением 5 и стандартным отклонением 1. Эта зависимость также может быть выражена с помощью стандартной функций ошибок:

$$P(\text{Pr}) = 0.5 \cdot \left[ 1 + \text{erf}\left(\frac{\text{Pr}-5}{\sqrt{2}}\right) \right]. \quad (2.105)$$

В случае воздействия потока теплового излучения на человека Руководство по безопасности [93] рекомендует для вычисления величины Pr соотношение:

$$\text{Pr} = -12.8 + 2.56 \cdot \ln\left(t_s \cdot I^{4/3}\right), \quad (2.106)$$

где I – интенсивность падающего теплового потока, кВт/м<sup>2</sup>;

$t_3$  – эффективное время экспозиции, с, которое может быть рассчитано по соотношениям:

$$\text{а) в случае ОШ:} \quad t_3 = 0.92 \cdot m_{\text{ош}}^{0.303}; \quad (2.107)$$

$$\text{б) пожара пролива (факела):} \quad t_3 = t_0 + \frac{x_6}{u_{\text{ср}}}; \quad (2.108)$$

где  $t_0$  – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о спасении, которое может быть принято равным 5 с;

$x_6$  – расстояние от границы пламени до безопасной зоны, м (точки, где интенсивность теплового излучения уменьшается до 4 кВт/м<sup>2</sup>);

$u_{\text{ср}}$  – средняя скорость движения человека к безопасной зоне, принимается равной 5 м/с.

Вместо интегрирования уравнения (2.104) величина условной вероятности поражения  $P$  по известному значению  $Pr$  может быть найдена по таблице 2.13.

В уравнении (2.106) скрыта немалая неопределенность, поскольку оно, как известно, разработано на основании анализа воздействия на людей теплового излучения ядерного взрыва, [149]. Авторы "зеленой" книги TNO [149] указывают на одно важное обстоятельство, отличающее эффект воздействия на кожу человека теплового потока ядерного взрыва и пожара углеводородов. В первом случае почти вся волновая энергия сосредоточена в диапазоне длин волн менее 1 мкм, в то время как во втором случае более значима инфракрасная область спектра. Между тем известно, что чем больше длина волны, тем глубже оно проникает в ткань. В этой связи тепловое излучение пожаров проливов углеводородов опаснее для человека, чем воздействие огненного шара ядерного взрыва.

Таблица 2.13 – *Связь между условной вероятностью поражения и значением пробит-функции*

Условная вероятность поражения, %	Величина пробит-функции $Pr$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Укажем, что для источников теплового излучения типа пожара пролива углеводородов CPR-16E рекомендует следующие значения пробит-функций (без учета наличия на человеке одежды),  $[I_1] = \text{кВт/м}^2$ :

а) возникновения ожогов I степени:

$$Pr = -39.83 + 3.02 \cdot \ln(t_3 \cdot I_1^{4/3}); \quad (2.109)$$

б) возникновения ожогов II степени:

$$Pr = -43.14 + 3.02 \cdot \ln(t_3 \cdot I_1^{4/3}); \quad (2.110)$$

в) смертельного поражения:

$$Pr = -36.38 + 2.56 \cdot \ln(t_3 \cdot I_1^{4/3}). \quad (2.111)$$

### 2.6.2 Методы ущерба от воздействия воздушной взрывной волны

Ущерб людям, имуществу и компонентам природной среды в результате взрыва (пожара) может быть причинен не только термическими поражающими факторами, но и барическим и осколочным воздействием. Проанализируем неопределенность, сопровождающую этап оценки ущерба от воздействия воздушной взрывной волны.

Эффекты воздействия ВВВ на здания моделируются в ряде Руководств по безопасности, утвержденных Ростехнадзором. Описаны как детерминированный, так и вероятностный подходы. В рамках детерминированного подхода Руководство по безопасности [93] рекомендует в качестве пороговой величины избыточного давления на фронте падающей взрывной волны: а) безопасного для человека  $\Delta P_6 = 5$  кПа; б) смертельного поражения  $\Delta P_{см} = 120$  кПа; в) для определения числа пострадавших  $\Delta P_{п} = 70$  кПа.

Детерминированные критерии (пороговые значения избыточного давления  $\Delta P$ ) повреждения взрывной волной промышленных зданий приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – *Критерии разрушения взрывной волной типовых промышленных зданий*

Степень поражения	$\Delta P$ , кПа
Полное разрушение зданий	Более 100
Тяжелые повреждения, здание подлежит сносу	70
Средние повреждения зданий, возможно восстановление здания	28
Разрушение оконных проемов, легкобрасываемых конструкций	14
Частичное разрушение остекления	Менее 2

Таблица 2.15 из [93] позволяет спрогнозировать степень разрушения зданий разного типа при падении на них взрывной волны. Отметим, что отраслевой стандарт ОАО "Газпром" [107] приводит более подробную таблицу детерминированных критериев повреждения оборудования взрывной волной:

Таблица 2.15 – *Критерии разрушений различной степени тяжести, причиняемых взрывной волной зданиям и сооружениям*

Тип зданий, сооружений	Степень разрушения/ $\Delta P$ , кПа			
	слабое	среднее	сильное	полное
Промышленные здания с тяжелым металлическим или железобетонным каркасом	20-30	30-40	40-50	>50
Промышленные здания с легким каркасом и бескаркасной конструкции	10 - 20	25 - 35	35 - 45	>45
Складские кирпичные здания	10 - 20	20 - 30	30 - 40	>40
Бетонные и железобетонные здания и антисейсмические конструкции	25 - 35	80 - 120	150 - 200	>200
Здания железобетонные монолитные повышенной этажности	25 - 45	45 - 105	105 - 170	170 - 215
Котельные, регуляторные станции в кирпичных зданиях	10 - 15	15 - 25	25 - 35	35 - 45
Деревянные дома	6 - 8	8 - 12	12 - 20	>20
Подземные сети, трубопроводы	400 - 600	600 - 1000	1000 - 1500	1500
Трубопроводы наземные	20	50	130	-
Кабельные подземные линии	до 800	-	-	1500
Цистерны для перевозки нефтепродуктов	30	50	70	80
Резервуары и емкости стальные наземные	35	55	80	90
Подземные резервуары	40	75	150	200

Известная степень повреждения зданий позволяет прогнозировать условную вероятность травмирования и гибели находящихся в них людей.

Таблица 2.16 – *Зависимость условной вероятности поражения человека с разной степенью тяжести от степени разрушения здания*

Тяжесть поражения	Степень разрушения			
	полная	сильная	средняя	слабая
Смертельная	0.6	0.49	0.09	0
Тяжелая травма	0.37	0.34	0.1	0
Легкая травма	0.03	0.17	0.2	0.05

Как и в случае термического поражения, Руководства по КОР предлагают вероятностный метод оценки ущерба при воздействии взрывной волны на людей, здания и сооружения. Так, Руководство по безопасности [93] рекомендует следующие соотношения для расчета пробит-функций, отвечающих различным видам барического поражения людей, находящихся на открытой местности:

а) пробит-функция вероятности наступления состояния нокдауна (длительной потери управляемости у людей):

$$\text{Pr}_{\text{нд}} = 5 - 5.74 \cdot \ln V_{\text{нд}}, \quad (2.112)$$

где:

$$V_{\text{нд}} = \frac{4.2}{\bar{p}} + \frac{1.3}{\bar{i}}, \quad (2.113)$$

$$\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0}, \quad (2.114)$$

$$\bar{i} = \frac{I^+}{P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}}; \quad (2.115)$$

$m$  – масса тела живого организма, кг;

$\Delta P$  – избыточное давление взрыва, Па;

$P_0$  – атмосферное давление, Па;

$I^+$  – импульс фазы сжатия взрывной волны, Па·с;

б) пробит-функция вероятности разрыва барабанных перепонок:

$$\text{Pr}_{\text{бп}} = -12.6 + 1.524 \cdot \ln \Delta P; \quad (2.116)$$

в) пробит-функция вероятности метательного действия взрыва (отброса человека взрывной волной):

$$\text{Pr}_{\text{отб}} = 5 - 2.44 \cdot \ln V_{\text{отб}}, \quad (2.117)$$

где

$$V_{\text{отб}} = \frac{7.38 \cdot 10^{-3}}{\Delta P} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot I^+}. \quad (2.118)$$

Укажем, что, по мнению авторов СТО Газпром [107] наибольшая опасность для человека при падении на него ВВВ заключается в гибели от удара головой, поэтому данный стандарт рекомендует оценивать только вероятность (в), пренебрегая эффектами (а) и (б) как более слабыми.

Вероятностный подход к оценке барического поражения зданий и сооружений заключается в рекомендуемых формулах для расчета соответствующих пробит-функций:

а) вероятности повреждений промышленных зданий, при которых возможно их восстановление:

$$\text{Pr}_{\text{зд1}} = 5 - 0.26 \cdot \ln V_{\text{зд1}}, \quad (2.119)$$

где

$$V_{зд1} = \left( \frac{17500}{\Delta P} \right)^{8.4} + \left( \frac{290}{I^+} \right)^{9.3}, \quad (2.120)$$

б) вероятности полного разрушений промышленных зданий, при которых они не подлежат восстановлению:

$$Pr_{зд2} = 5 - 0.22 \cdot \ln V_{зд2}, \quad (2.121)$$

где

$$V_{зд2} = \left( \frac{40000}{\Delta P} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I^+} \right)^{11.3}. \quad (2.122)$$

В рамках вероятностного подхода принимается: а) в области, где прогнозируемая вероятность поражения достигает 90% и более, происходит гарантированное поражение объектов-мишеней; б) безопасными с точки зрения барического поражения являются области, где значения пробит-функции достигают величин, соответствующих вероятности поражения в 1%.

Для сравнения – несколько слов об эпистемической неопределенности, заключающейся в различии подходов отечественных и зарубежных Руководств по КОР к оценке эффектов барического поражения. Американское Руководство [173] указывает, что вышеприведенные соотношения для расчета пробит-функций заключают в себе некоторую неопределенность, поскольку они базируются на анализе экспериментальной информации, полученной: а) при воздействии ударных волн во время бомбардировок английских городов Luftwaffe, а также ракетами V-1 и V-2; б) из отчета [166] о применении ядерного оружия.

Авторы "зеленой" книги TNO [149] указывают, что воздушная взрывная волна оказывает на человека как статическое (из-за разности давлений), так и динамическое ("взрывной ветер") воздействие. В этой связи более точный прогноз ущерба для людей возможен только при учете данного обстоятельства. В отличие от отечественных Руководств по КОР, CPR-16E [149] дифференцирует оценку вероятности гибели человека при отбрасывании его ВВВ от удара головой или всем телом.

Для более точного прогноза воздействия воздушных взрывных волн на здания [149] рекомендует учитывать эффект их отражения от стен. Согласно расчетам авторов CPR-16E суммарное избыточное давление на препятствие, создаваемое при отражении от него падающих ударных волн, может превышать давление  $\Delta P$  падающей волны в восемь и даже 12 раз!

Отдельной сложной темой является прогнозирование поведения строительных конструкций при их нагружении взрывной волной. Все виды нагрузок на строительные конструкции можно условно отнести к двум типам:

а) ступенчатое, квазистатическое нагружение со стороны воздушных взрывных волн (при дефлаграционных взрывах);

б) нагрузки импульсного типа, создаваемые ударными волнами.

Для грубых оценок пороговых нагрузок, вызывающих разрушение зданий и сооружений, необходима следующая информация:

1) о падающей ВВВ:

а) тип нагрузки (импульсная или квазистатическая);

б) величина амплитуды избыточного давления;

в) длительность положительной фазы волны;

2) строительном объекте:

а) предел упругой деформации;

б) частота собственных колебаний (под действием импульсных нагрузок возбуждаются колебания самой низкой частоты);

в) коэффициент пластичности.

Результат воздействия ВВВ на здания сильно зависит от соотношения периода их собственных колебания и длительности фронта волны.

### **2.6.3 Методы оценки ущерба при осколочном поражении**

Как уже отмечалось, наряду с барическим воздействием ВВВ, взрывы могут сопровождаться осколочным поражением людей и имущества, которое, по мнению некоторых специалистов, часто является наиболее пагубным.

Из всех рассматриваемых видов ущерба взрывов и пожаров, прогноз осколочного поражения обладает наибольшей неопределенностью. Это обусловлено как объективными, так и субъективными (эпистемическими) причинами. Объективный фактор в данном случае заключается в случайности разлета осколков и обломков: их массы и формы, направления, угла атаки и начальной скорости. В силу этого траектория полета и, соответственно, последствия столкновения каждого обломка с объектом-мишенью не поддается точному прогнозу. Эпистемический фактор связан со скудностью имеющегося теоретического задела по данному феномену.

Для оценки осколочного действия взрыва Руководства по безопасности, утвержденные Ростехнадзором, отсылают к отраслевому стандарту ОАО "Газпром" [107]. Учитывая обычную массу осколков (обломков) при аварии [107] принимает, что в случае попадания осколка в человека последний погибнет. При этом тело человека моделируется вертикально расположенным цилиндром высотой 1.8 метра и радиусом основания 0.3.

В качестве параметра, позволяющего моделировать ущерб от столкновения летящего осколка со зданием, оборудованием или транспортным средством в [107] принята его относительная масса  $\alpha_{\text{оск}} = m_{\text{оск}}/m_{\text{обор}}$ , таблица 2.17:

Таблица 2.17 – *Пороговые значения  $\alpha_{\text{оск}}$  соответствующие различной степени повреждения зданий, сооружений и транспортных средств*

$\alpha_{\text{оск}}$	0.001 – 0.01	0.01 – 0.05	0.05 – 0.1	> 0.1
Степень повреждения	слабое, $k_{\text{повр}} = 0.1$	среднее, $k_{\text{повр}} = 0.4$	сильное, $k_{\text{повр}} = 0.7$	Полное $k_{\text{повр}} = 1$
<i>Примечание: <math>k_{\text{повр}}</math> отождествляется с долей от стоимости полного восстановления здания (сооружения, транспортного средства)</i>				

В целях демонстрации эпистемической неопределенности этапа КОР, отвечающего оценке ущерба осколочного поражения при взрыве, рассмотрим некоторые аспекты подходов зарубежных Руководств по КОР к данному вопросу.

Осколочному поражению людей при взрывах в CPR-16E посвящен специальный раздел. Фрагменты, разбрасываемые взрывом и сталкивающиеся с телом человека, [149] делит на *осколки* и *обломки*: а) осколками названы колющие (способные проникать через кожу) фрагменты, б) обломками – неколющие, имеющие, как правило, значительную массу предметы.

*Поражение осколками.* Приведена корреляция для глубины  $x$ , м, проникновения осколка в тело человека:

$$x = \frac{m_{\text{оск}} \cdot (c \cdot u_{\text{оск}} - f)}{c^2 \cdot A_{\text{оск}}}, \quad (2.123)$$

где  $f$  – сила сопротивления проникновению осколка кожи как упруго-вязкой среды, Н:

$$f = f_0 + c \cdot u_{\text{оск}}; \quad (2.124)$$

$A_{\text{оск}}$  – площадь поперечного сечения осколка,  $\text{м}^2$ ;

$c$  – вспомогательный коэффициент,  $\text{кг/с}$ .

Для вероятностного описания осколочного поражения людей может быть использована корреляция, позволяющая рассчитать скорость осколка в момент удара, при которой происходит его проникновение на 50% в глубину тканей человека, как функции отношения  $A_{\text{оск}}/m_{\text{оск}}$ :

$$u_{\text{оск.50}} = \frac{1247 \cdot A_{\text{оск}}}{m_{\text{оск}}} + 22.03. \quad (2.125)$$

В качестве критерия поражения можно принять, что серьезные ранения возникают, если глубина проникновения осколка превышает 1 см, либо, если он достигает кости.

Вместо отношения  $A_{\text{оск}}/m_{\text{оск}}$  часто используют его аналог  $k_4$ , имеющий размерность плотности:

$$k_4 = \frac{m_{\text{оск}}}{A_{\text{оск}}^{3/2}}. \quad (2.126)$$

Преобразованная корреляция (2.121):

$$u_{\text{оск.50}} = \frac{1247}{(k_4 \cdot m_{\text{оск}})^{1/3}} + 22.03. \quad (2.127)$$

Для оценки поражения человека осколками стекла была проведена серия экспериментов на животных, как с голой кожей, так и с кожей, покрытой шерстью. Итоги этих опытов в [149] приведены в виде номограммы для определения  $u_{\text{оск.50}}$ , м/с.

Кроме того, в таблице III [149] для осколков стекла приведены значения скорости  $u_{\text{оск.50}}$ , м/с, при которой они на половину своего размера проникают внутрь головы человека – в зависимости от массы осколка и угла его падения.

*Поражение обломками.* В силу большой массы удар такого фрагмента чреват разрушением костей человека, поэтому серьезность ранения, прежде всего, зависит от того, в какую часть тела ударит обломок. В США принято считать, что обломок представляет опасность для человека, если его кинетическая энергия превышает 79 Дж. Между тем, согласно статистике реальных аварий, [149], неоднократно наблюдались серьезные ранения людей фрагментами, обладающими кинетической энергией 40 ÷ 60 Дж.

Авторы CPR-16E подчеркивают, что опубликованные об осколочном поражении человека данные очень скудны, в качестве их обобщения они предлагают номограмму 2.5.

Для выполнения аналитических оценок приведены корреляции для пробит-функций вероятности гибели человека:

а) при ударе осколки массой более 4.5 кг (примерно соответствующей массе головы человека):

$$\text{Pr}_{\text{оск1}} = -13.19 + 10.54 \cdot \ln u_{\text{оск}}; \quad (2.128)$$

б) массой от 0.1 до 4.5 кг:

$$\text{Pr}_{\text{оск2}} = -17.56 + 5.3 \cdot \ln S_{\text{оск}}; \quad (2.129)$$

где  $S_{\text{оск}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{оск}} \cdot u_{\text{оск}}^2$ .

в) массой от 0.001 до 0.1 кг:

$$Pr_{\text{оскз}} = -29.15 + 2.1 \cdot \ln S'_{\text{оск}} ; \quad (2.130)$$

где  $S'_{\text{оск}} = m_{\text{оск}} \cdot u_{\text{оск}}^{5.115}$ .

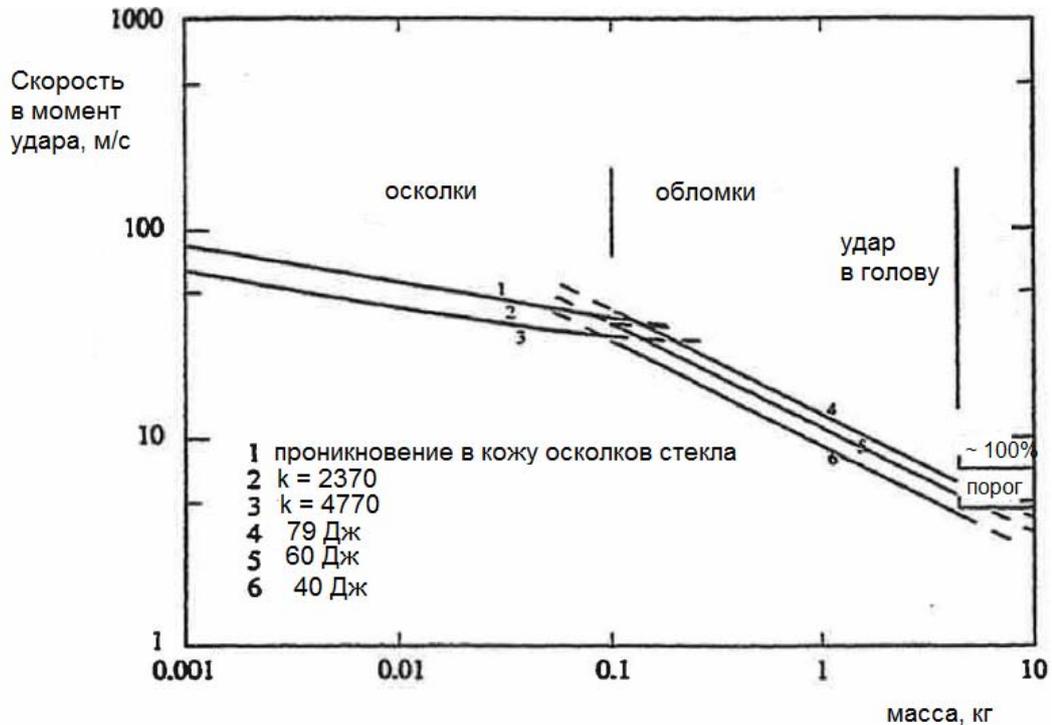


Рисунок 2.5 – Критерии ранения человека осколками и обломками, [149]

#### 2.6.4 Прогнозирование размера ущерба при эскалации аварии

Специального раздела, посвященного анализу аварий каскадного типа, в отечественных руководствах по КОР нет. С одной стороны, физико-химические механизмы аварий типа "домино" ничем не отличаются от обычных аварий, с другой, сложность их моделирования, и сопутствующая ему неопределенность, безусловно, существенно больше, чем рассмотренных нами выше отдельных сценариев.

Руководство CCPS of AIChE [173] напоминает, что аварии каскадного типа происходили неоднократно, нанесенный ими ущерб всегда очень значителен. Поэтому полная КОР всегда должна включать оценки риска по механизму "домино", иначе полученные оценки будут неполны. Очевидно, что сам учет возможности эскалации аварии приводит к увеличению величины риска, которое можно оценить по увеличению величины прогнозируемого ущерба. Авторы [173] выражают закономерное удивление тем обстоятельством, что небольшое число опубликованных работ по проблеме каскадного механизма развития аварий совершенно неадекватно значимости проблемы.

Некоторый опыт оценки риска аварий с учетом эффекта "домино" имеется у британского агентства HSE. При выполнении КОР им учитывалось увеличение: а) вероятности головных событий за счет вторичных аварий (инициированных ранее произошедшими взрывами (пожарами) на соседних опасных объектах); б) прогнозируемого ущерба, обусловленного "эффектом домино".

Руководство по КОР [173] подчеркивает, что для корректного учета сценариев каскадного развития аварий необходимо располагать точным картографическим материалом с расположением опасных объектов и результатами количественной оценки полей поражающих факторов, полученных на предыдущих этапах КОР.

### **2.6.5 Источники неопределенности, сопутствующей оценке ущерба в натуральном выражении**

Анализ неопределенности, сопровождающей четвертый этап процедуры КОР, позволил выявить следующие ее источники:

#### *1 Терминологического типа:*

- исчерпывающий терминологический аппарат данного этапа КОР к настоящему времени отсутствует, для описания видов ущерба от аварии, его характеристик используются различные термины и понятия. В ряде случаев четкое и однозначное толкование термина не приводится (например, для пороговой интенсивности теплового потока, вызывающего гибель объектов природной среды не указана продолжительность экспозиции).

#### *2 Модельного типа:*

##### *2.1 концептуальной:*

- вероятностный подход к прогнозированию ущерба объектам-мишеням при аварии без какого-либо обоснования постулирует применимость нормального закона распределения величины поражения;
- корреляции, полученные по итогам применения: а) ядерного оружия используются для моделирования эффектов воздействия на людей, здания и оборудование теплового излучения пожаров проливов; б) обычных боеприпасов – взрывных волн дефлаграционных взрывов;
- соотношения, основанные на результатах воздействия ударных волн на здания снаружи, неправомерно рекомендуются для прогнозирования последствий внутренних взрывов;
- подход к оценке ущерба людям и зданиям при внутренних взрывах не разработан;

- при прогнозировании эффектов поражения Руководства по КОР не делают различий между падающим на объект-мишень и поглощенным тепловым излучением;
- в отечественных Руководствах по КОР отсутствуют аналитические выражения, позволяющие учесть наличие на человеке одежды (при воздействии теплового потока);
- отсутствуют расчетные соотношения для пробит-функций степени поражения объектов-мишеней (особенно в части экологической составляющей полного ущерба, а также осколочного поражения);

## 2.2 аппроксимации:

- велика альтернативность значений коэффициентов в формулах пробит-функций, рекомендуемых различными Руководствами по КОР;
- различаются формулы для расчета параметра  $\bar{p}$  в одинаковых формулах пробит-функции при прогнозировании состояния нокдауна человека при барическом воздействии: а) по [93]

$$\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0} ; \text{ б) по [61]} \quad \bar{p} = \frac{\Delta P}{P_0} .$$

3 *Параметрического типа*: параметры рекомендуемых расчетных соотношений для пробит-функций заданы точечными числами, содержащими скрытую неопределенность.

## 2.7 Неопределенность оценки ущерба от аварии в денежном выражении

Рассмотрение начнем с трактовки самого понятия ущерба при аварии. Руководство по безопасности [93] трактует его как "потери (убытки) в производственной и непроизводственной сферах жизнедеятельности человека, а также при негативном изменении окружающей среды, причиненные в результате аварии на ОПО и исчисляемые в натуральной (денежной) форме", не называя субъекта причинения вреда. Методические рекомендации РД 03-496-02 [84] называют ущербом от аварии "потери некоторым субъектом или группой субъектов части или всех своих ценностей".

Пострадавшими при аварии на ВПОО субъектами, вообще говоря, могут быть: население, персонал, имущественные интересы владельца опасного объекта, имущественные интересы третьих лиц, компоненты природной среды. В последнем случае в качестве субъекта причинения вреда выступает народ Российской Федерации (общество), делегировавшее защиту своих прав государству.

В результате реализации страховых механизмов (обязательного страхования гражданской ответственности владельцев ОПО, [123]) ущерб персоналу и населению, имуществу третьих лиц (в пределах страховой суммы) будет скомпенсирован страховщиком, поэтому субъектом причинения вреда является страховая компания.

Потери общества, наряду с загрязнением природной среды и ее деградацией, заключаются в выбытии трудовых ресурсов, утрате или повреждении объектов культурного или духовного наследия, однако количественная оценка последних очень сложна.

Рассматривая составляющие полного ущерба от аварии, сошлемся на определение, даваемое Руководством по безопасности [93]: "оценка последствий и ущерба от возможных аварий включает описание и определение размеров возможных воздействий на людей, имущество и (или) окружающую среду". Следовательно, величина полного ущерба от аварии является суммой этих трех составляющих. С учетом различной природы аварийного ущерба в натуральном выражении для людей, имущества и компонентов природной среды их непосредственное суммирование невозможно, поэтому единственным способом выразить совокупный аварийный ущерб числом является задание всех его слагаемых в единицах одинаковой размерности, т.е. в денежном эквиваленте.

Таким образом, завершающий, пятый этап процедуры КОР должен заключаться в получении величины денежного эквивалента ущерба от аварии с учетом всех трех его составляющих (гуманитарного, материального и экологического). Предметом исследования настоящего раздела является методология такой оценки и сопровождающая ее неопределенность.

### **2.7.1 Методы расчета денежного эквивалента полного ущерба, вызванного аварией**

Проанализируем действующие подходы к оценке денежного эквивалента аварийного ущерба, начав с РД 03-496-02 [84]. Данный документ предназначен для расчета величины ущерба как уже произошедших, так и прогнозируемых аварий. Согласно РД 03-496-02 в наиболее общем случае полный ущерб аварии включает следующие составляющие:

- прямой материальный ущерб организации, эксплуатирующей ОПО;
- расходы на ликвидацию аварии;
- медико-биологические потери, связанные с травмированием и гибелью людей (гуманитарный ущерб);
- экологический ущерб (вред, причиненный окружающей природной среде);
- косвенный ущерб организации, эксплуатирующей ОПО;
- потери государства от выбытия трудовых ресурсов.

В свою очередь:

- прямой материальный ущерб включает восстановительную стоимость утраченных или поврежденных основных фондов (зданий и оборудования), сырья и готовой продукции, а также имущества третьих лиц;
- расходы на ликвидацию аварии – прямые расходы на восстановление поврежденного имущества и проведение расследования аварии;
- гуманитарный ущерб определен как сумма затрат на компенсации и мероприятия вследствие гибели персонала;
- косвенный ущерб складывается из недополученной прибыли во время простоя, а также – различных штрафов и неустоек за срыв поставок;
- экологический ущерб рассчитывается как сумма платежей за сверхнормативное загрязнение природных сред (атмосферного воздуха, почвы и поверхностных водных объектов) и стоимости уничтоженных или поврежденных биоресурсов.

РД 03-496-02 различает подходы к оценке ущерба уже произошедших и прогнозируемых аварий на опасном производственном объекте. Если в первом случае ситуация с ущербом известна, что называется, "в деталях", то во втором возможны лишь приближенные оценки. Для оценки прогнозируемого материального ущерба рекомендовано применение Сборников укрупненных показателей восстановительной стоимости (УПВС) с приведением этого показателя к уровню текущих цен с помощью индексов (возможно, например, использование индексов, публикуемых компанией "КО-ИНВЕСТ").

Гуманитарный ущерб по версии [84] включает затраты на погребение погибших, выплаты иждивенцам на потерю кормильца, стоимость лекарств и санаторно-курортного обеспечения для пострадавших и т.п.

Для сравнительных целей проанализируем подходы к экономической оценке ущерба ЧС (в т.ч. техногенных), изложенные в Единой межведомственной методике [33], разработанной в 2004 году ФГУ ВНИИ ГОЧС и согласованной девятью российскими ведомствами (Ростехнадзором, Минфином, Минпромэнерго, Минтрансом, Минздравсоцразвития, РАН и др.). Согласно пп. 2 и 3 Методика [33] может быть использована как для будущих событий – прогнозируемых ЧС, так и при расследовании уже произошедших аварий и ЧС. Указано, что экономической оценке должна предшествовать количественная оценка ущерба в физическом (натуральном) выражении. Методика рассчитана для оценки ущер-

ба ЧС любого территориального масштаба: объектового (предприятия), муниципального, уровня субъекта РФ или федерального.

Внимательный анализ [33] показывает, что этот НМД, подобно предыдущему, является не методикой, а скорее Руководящими принципами, или Методическими рекомендациями (англоязычный аналог *guidelines*), поскольку выполнение оценок с его помощью невозможно без привлечения множества других специальных нормативно-методических документов (НМД).

Единая методика [33] различает следующие виды ущерба от ЧС:

- медико-биологический (гуманитарный) – ущерб жизни и здоровью людей, определяемый нарушениями их здоровья, ведущими для некоторой популяции (населения пострадавшей территории) к социальным потерям и, в итоге, сокращению средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни (СОПЖ);
- социально-экономический – ущерб социально-экономической системе, заключающийся в утрате того или иного вида собственности, затратах на переселение людей, выплате компенсаций пострадавшим, упущенной выгоде от не заключенных и расторгнутых контрактов, нарушении процесса нормальной хозяйственной деятельности, ухудшении условий жизнедеятельности людей и т.д.;
- социально-политический – ущерб государству;
- экологический – ущерб природной среде, включающий ухудшение природной среды или затраты на ее реабилитацию, потеря народнохозяйственной ценности территорий или затраты на ее восстановление.

Методика [33] допускает использование "экономических оценок неэкономических составляющих ущерба от ЧС", в том числе – гуманитарного, морального, экологического, культурным ценностям, и других.

Утверждается, что прямые методы подсчета ущерба способны дать более точную оценку при максимально полном учете всех его составляющих, однако они очень трудоемки. Косвенные методы при меньшей трудоемкости, естественно, менее точны.

Единая методика [33] называет три объекта нанесения ущерба при ЧС:

- физические лица;
- имущество физических и юридических лиц;
- окружающая природная среда;

что несколько противоречит другим ее положениям, согласно которым объектом причине-

ния ущерба могут являться также общество и государство.

Поскольку для оценки материального и экологического ущерба в России имеется сложившаяся нормативно-методическая база, в том числе – ведомственная (уточненная с учетом специфики отдельных видов ЧС), она и подлежит применению. Учитывая, что денежная (стоимостная) оценка ущерба физическим лицам в России по состоянию на 2004 год не была "формализована", [33] рекомендует использовать для оценки гуманитарного ущерба такие внеэкономические инструменты, как решение суда или мировое соглашение сторон.

Прямой экономический ущерб, обусловленный ЧС, характеризует не только непосредственное уничтожение, разрушение, повреждение любых видов имущества и материальных ценностей, но и затраты на проведение спасательных работ, эвакуации, временному размещению и переселению людей, оказанию им срочной медицинской помощи; а также единовременные выплаты пострадавшим и их семьям. Прямой экономический ущерб имуществу физических лиц, как при прогнозируемых, так и произошедших ЧС, может быть оценен только экспертным методом.

Ценным положением Единой методики является указание на то, что косвенный ущерб при ЧС часто обусловлен событиями "каскадного типа", поэтому стоимостное его выражение возможно "лишь на основе весьма грубых и произвольных оценок". В этой связи [33] подчеркивает, что "расчеты и/или оценки косвенного экономического ущерба ... объективно обладают достаточно высокой степенью неопределенности и недостаточной достоверностью". В силу этого и полный ущерб, являющийся суммой прямого и косвенного ущербов, также обладает большой неопределенностью.

С учетом пролонгированных негативных эффектов крупных ЧС, каскадного механизма косвенного ущерба, [33] предлагает рассчитывать дисконтированную величину полного ущерба  $U_k$ , рублей:

$$U_k = \sum_{r=0}^{R_k} \frac{U_{kr}}{(1+\delta)^r}, \quad (2.131)$$

где  $\delta$  – ставка дисконтирования;

$R_k$  – продолжительность жизненного цикла ликвидации последствий, лет;

$U_{kr}$  – величина полного ущерба в  $r$ -том году, рублей.

Принципиально важно отметить, что Единая методика в качестве ущерба при аварии/ЧС использует консервативную оценку – максимально возможный ущерб, который может быть причинен в результате этой аварии/ЧС.

В заключение анализа [33] нельзя не отметить некоторой неоднозначности трактовки ею понятия "риск": с одной стороны, термин "риск ЧС" понимается как "вероятность или частота возникновения источника чрезвычайной ситуации", с другой, в п.1.9 сообщается, что риск "оценивается математическим ожиданием ущерба". И еще ниже: "в зависимости от решаемых задач риск представляется в виде:

- математического ожидания ущерба определенного рода за год;
- вероятности наступления неблагоприятного события за год".

Подобная неоднозначность толкования базовых понятий методологии недопустима.

В заключение раздела проанализируем действующие методологические подходы к оценке экологического ущерба.

Нормативная база расчета величины платы за загрязнение атмосферы и почв в результате аварии в настоящее время образована следующими документами: [62], [63], [72], [78], [80]. Порядок расчета платы таков: сначала с использованием соответствующих методик определяется величина выброса загрязняющих веществ в атмосферу и/или масштаб загрязнения почв вследствие аварии; затем, на основании Постановлений Правительства РФ [78], [80] рассчитывается сумма платежей.

Следует подчеркнуть, что платежи владельца ВПОО за загрязнение (сверхнормативное) компонентов природных сред в результате аварии, являются лишь мерой для количественной оценки экологического вреда, но не способны компенсировать обществу экологический ущерб, причиненный аварией.

### **2.7.2 Методологические подходы к монетарной оценке гуманитарного ущерба, обусловленного аварией**

Учитывая наименьшую разработанность проблемы монетарной оценки гуманитарного (медико-биологического, медико-социального) ущерба, уделим ей особое внимание. Анализ опубликованных по данной теме в России работ показал, что обоснование величины ущерба данного типа возможно как экономическими, так и неэкономическими методами.

Прежде всего, следует подчеркнуть, что оценка средней стоимости человеческой жизни (ССЖ) может выполняться для двух целей, [32]:

- а) оценки потерь общества из-за гибели человека;
- б) расчета размера компенсационных выплат пострадавшему, либо его семье.

Очевидно, что размер сумм, рассчитанных для целей (а), должен быть больше, чем для целей (б).

В настоящее время в области промышленной безопасности действует страховой механизм, [123], согласно которому в случае гибели пострадавшего в результате аварии его семье выплачивается сумма в 2 млн. рублей. Кроме того, страховщик компенсирует расходы на погребение погибших. Таким образом, для владельца ОПО в случае аварии гуманитарный ущерб будет отсутствовать, его понесет страховая компания.

При получении из-за аварии персоналом или третьими лицами несмертельных поражений, величин страховой выплаты будет зависеть от степени повреждения здоровья. В случае уже произошедшей аварии, когда вид травмы известен в деталях, степень повреждения здоровья может быть относительно точно оценена на основании Постановления Правительства РФ [77]. Одновременно для прогнозируемых аварий, при которых возможны только укрупненные оценки возможных повреждений здоровья людей, с помощью [77] могут быть получены лишь интервальные оценки.

Таким образом, величину гуманитарного ущерба для компенсационных выплат следует оценить величиной 2 млн. рублей на каждого погибшего, либо ее долей – в зависимости от степени повреждения здоровья пострадавших в результате аварии. Что касается цели (а), признавая, что гибель каждого человека является утратой для общества, специалисты давно делали попытки придать жизни человека стоимостной смысл и выразить гуманитарный ущерб в денежном эквиваленте. Наибольшее распространение получила величина ССЖ, измеряемая в денежных единицах.

Считается, [112], что первым поставил вопрос о необходимости количественной оценки денежного эквивалента материальных потерь при гибели человека Карл Клаузевиц в своем знаменитом трактате "О войне" [143]. Первые практически применимые методики для оценки денежного эквивалента стоимости жизни при гибели человека (ССЖ), по мнению авторов [112], появились в 1963 и 1965 годах.

Трунов И.Л. с коллегами в статье [112] утверждает, что методические подходы, разработанные для оценки стоимости жизни человека, можно условно разделить на медицинские и технические. Между тем принципиального различия между ними нет, по-

сколько те и другие рассматривают человека исключительно как орудие производства. Они пишут, что "по существу оценивается не человек как таковой, а его экономические возможности". На принципиальную порочность такого подхода Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) указала еще в 1983 году в своей публикации [184] (имеется русский перевод [68]): "Метод оценки жизни предполагает, что индивиды подобны некоторому типу производственного оборудования, чья потенциальная производительность (отдача) утрачивается в связи с преждевременной кончиной... Принятие этого подхода привело бы к выводу, что безвременная смерть пожилых людей приносит обществу чистую пользу".

Востоков В.Ю. с соавторами в своей статье [14], называет три метода для оценки величины ССЖ (на самом деле их гораздо больше).

В завершение рассмотрим предложения Российского научного общества анализа риска (РНОАР) о величине ССЖ, изложенные им в виде соответствующей Декларации [32]. В данном документе, принятом на конференции Общества в 2007 году, при оценке величины ущерба [обществу] от чрезвычайных ситуаций, а также проведении расчетов в целях обоснования снижения риска, рекомендована величина ССЖ в диапазоне 30 ÷ 40 млн. рублей. Одновременно для компенсационных и страховых выплат семьям погибших РНОАР посчитало целесообразной величину ССЖ 7 ÷ 10 млн. рублей.

Теоретическое обоснование данной Декларации приведено в статьях А.А Быкова [11], А.А.Быкова и М.И.Фалеева [12]. Авторы [12] полагают, что наилучшим из анализируемых ими подходов к определению величины ССЖ является подход, основанный на концепции потребительской стоимости или "готовности общества платить". С точки зрения интересов общества, по мнению авторов [12], гибель каждого человека можно трактовать как утрату полезности, которую этот человек представлял для общества. В свою очередь, в экономическом измерении полезность может быть оценена величиной:

- а) годового среднедушевого внутреннего валового продукта (ВВП);
- б) среднедушевого дохода, который человек извлекает для себя в течение года.

Для оценки величины ССЖ (Россия, 2003 г.) в [12] использовано соотношение

$$ССЖ = \frac{Д}{P_x^{(m)}}, \quad (2.132)$$

где Д – а) среднедушевой ежемесячный доход человека, 5140 рублей/месяц; б) среднедушевой месячный ВВП, 7754 рублей/месяц;

$P_x^{(m)}$  – ежемесячный ( $m = 12$ ) нетто-тариф пожизненного страхования человека в возрасте  $X$  лет. Для человека 37-ми лет авторы использовали оценку:  $P_{37}^{(12)} = 1.75 \cdot 10^{-3}$ .

В итоге по соотношению (2.132) ими получены следующие оценки ССЖ: по способу а) ССЖ  $\approx 2.94$  млн. рублей, способу б) ССЖ  $\approx 4.43$  млн. рублей. В долларовом эквиваленте, с учетом фактора неопределенности, согласно их оценке: ССЖ  $\approx \$ (50 \div 300) \cdot 10^3$ .

В литературе описаны следующие внеэкономические способы оценки величины ССЖ: а) основанные на практике компенсационных выплат погибшим в различных авариях и катастрофах, б) сумм страхования жизни, в) криминальных расценок выкупа или убийства человека. В статье [12] приведены полученные перечисленными методами оценки величины ССЖ среднего россиянина: а) по компенсационным выплатам ССЖ  $\approx \$ (850 \div 47600)$ ; б) обязательному страхованию жизни ССЖ  $\approx \$ (20 \div 100) \cdot 10^3$ ; в) криминальным расценкам  $\$ (5 \cdot 10^4 \div 6 \cdot 10^6)$ .

Подводя итог, Быков А.А. и Фалеев М.И. рекомендуют при оценке ущерба в качестве наиболее приемлемой для России величину ССЖ  $\$ (1 \div 3) \cdot 10^5$ .

### 2.7.3 Источники неопределенности этапа монетизации ущерба от аварии

При анализе действующей в настоящее время в России методической базы, разработанной для получения экономической оценки ущерба, нами обнаружено, что полученные на ее основе значения обладают очень большой неопределенностью. Можно указать на следующие ее источники:

#### 1 Терминологического типа:

- отсутствует общепринятый термин для обозначения вреда, причиняемого при взрыве/пожаре (аварии) персоналу/населению (используются альтернативы: медико-биологический, медико-социальный, гуманитарный);
- в некоторых НМД нечетко трактуются такие базовые понятия методологии, как риск;

#### 2 Модельного типа, концептуальной:

- НМД не всегда четко разграничивают две различные цели получения денежной оценки средней стоимости человеческой жизни, ведущие к двум различающимся денежным оценкам ССЖ;

- отсутствует единый перечень составляющих полного ущерба, подлежащего денежной оценке. Так, некоторые действующие НМД допускают включение в перечень морального вреда пострадавшим. Кроме того, неясна необходимость включения в этот перечень косвенного материального ущерба, с учетом указанной выше его большой неопределенности;

- некоторые действующие НМД допускают неэкономические способы получения монетарной оценки отдельных составляющих ущерба от аварии (взрыва/пожара);

- используются различные подходы к оценке величины ССЖ.

3 *Параметрического типа*: параметрическая неопределенность игнорируется, параметры рекомендуемых расчетных соотношений задаются точечными числами.

## 2.8 Пример количественной оценки модельной неопределенности

Во второй главе диссертации нами выполнен качественный анализ типа и источников неопределенности, сопутствующих всем пяти этапам процедуры КОР. В данном разделе на примере одного сценария развития аварии (длительного испарения пролива) покажем, насколько большой может быть неопределенность, обусловленная альтернативностью используемых моделей. Все расчеты будут выполнены в традиционной точечной постановке.

Выше, в разделе 2.5.2 были приведены соотношения для расчета удельной массовой скорости испарения  $w$ , кг/м<sup>2</sup>·с, ЛВЖ из пролива: а) нормативной методики МЧС РФ [61] и б) модели Кавамуры-МакКея, рекомендуемой зарубежными Руководствами по КОР [147], [148], [173].

С методической целью приведем еще одну альтернативу расчетного метода для данного параметра, рекомендуемую Руководством по КОР [246] Всемирного Банка. В нем указан метод, предложенный Саттоном (Sutton), [219], для расчета массовой скорости испарения  $w'$ , кг/с:

$$w' = \alpha_S \cdot \left[ \frac{P_H \cdot \mu}{\hat{R} \cdot T_B} \right] \cdot u_w^{\frac{2-n_S}{2+n_S}} \cdot r_{np}^{\frac{4+n_S}{2+n_S}}, \quad (2.133)$$

где  $r_{np} = d_{np}/2$  – радиус пролива, м;

$\mu$  – молярная масса (размерность не указана, она должна соответствовать размерности  $\hat{R}$ ).

Входящие в формулу (2.133) безразмерные параметры  $\alpha_S$  и  $n_S$ , зависящие от температурной стратификации атмосферы, предложено определять по таблице 2.18:

Таблица 2.18 – *Значения параметров модели Саттона при различной термической устойчивости атмосферы, [219]*

Тип температурной стратификации атмосферы	Параметр $n_S$	Параметр $\alpha_S$
Неустойчивая	0.2	$3.84 \cdot 10^{-3}$
Нейтральная	0.25	$4.685 \cdot 10^{-3}$
Устойчивая	0.3	$5.285 \cdot 10^{-3}$

Для расчета удельной массовой скорости испарения  $w$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , формулу, предложенную Саттоном, следует несколько модифицировать, [41]:

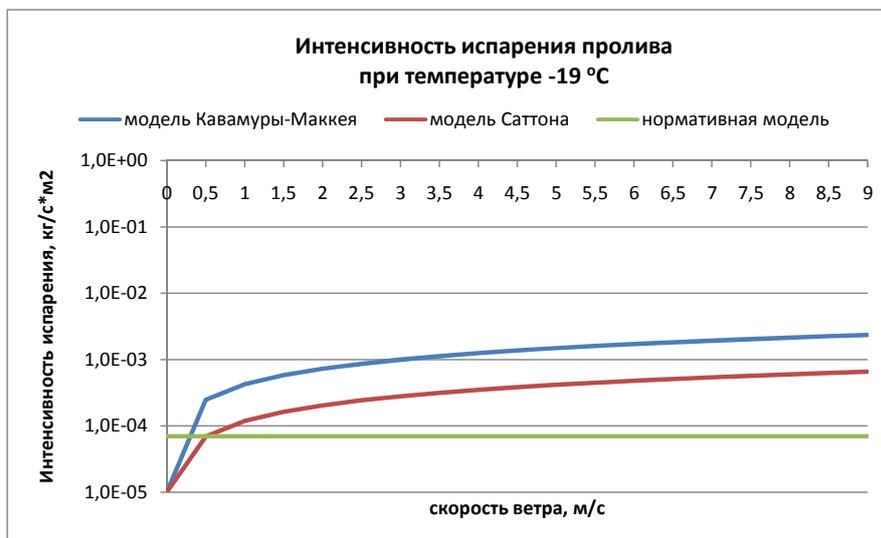
$$w = \frac{\alpha_S}{\pi} \cdot \left[ \frac{P_H \cdot \mu}{\hat{R} \cdot T_B} \right] \cdot u_w^{\frac{2-n_S}{2+n_S}} \cdot r_{\text{пр}}^{\frac{-n_S}{2+n_S}} \quad (2.134)$$

Рассчитаем величину  $w$  при скорости ветра в диапазоне  $0 \div 9$  м/с для трех значений температуры воздуха, с использованием трех альтернативных моделей: а) нормативной методики МЧС РФ; б) Кавамуры-МакКея; в) Саттона. Для этого рассмотрим условный пролив диаметром  $d_{\text{пр}} = 10$  м бензина с молярной массой 95  $\text{кг}/\text{кмоль}$ . Значения температуры атмосферного воздуха (пролива)  $t_a = -19; 3.4$  и  $25$  °С, коэффициенты модели Саттона:  $\alpha_S = 0.00456$ ;  $n_S = 0.25$ . Прочие параметры: универсальная газовая постоянная  $\hat{R} = 8314$  Дж/кмоль·К, константа  $C_{\text{К\&М}} = 0.004786$ ,  $S_{\text{сн}} = 0.8$ , константы уравнения Антуана:  $A = 4.123$ ;  $B = 664.976$ ;  $C_A = 221.695$ .

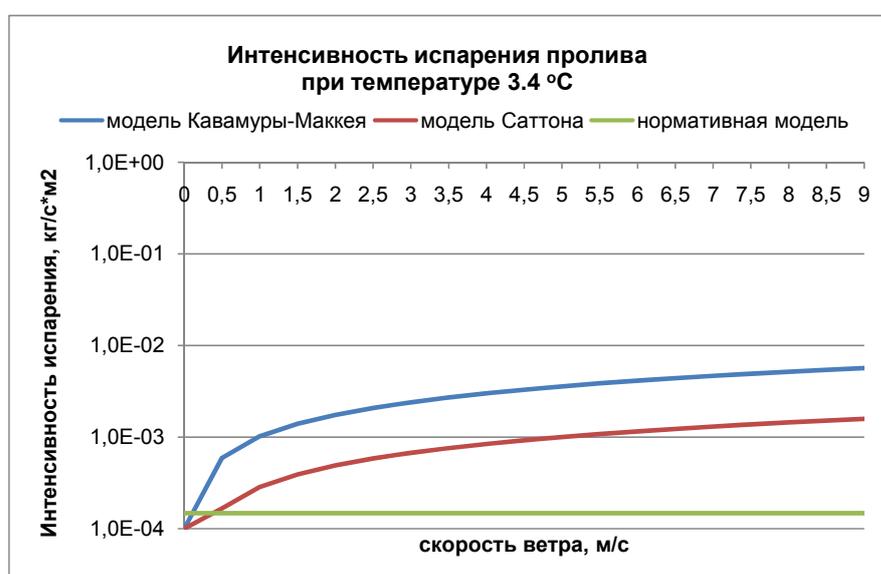
В нормативной модели используются размерности:  $[\mu] = \text{кг}/\text{кмоль}$ ,  $[P_H] = \text{кПа}$ ,  $[t_a] =$  °С; в моделях Саттона и Кавамуры-МакКея:  $[\mu] = \text{кг}/\text{моль}$ ,  $[P_H] = \text{Па}$ ,  $[T_a] = \text{К}$ .

Результаты расчетов в MS Excel величины удельной массовой скорости испарения  $w$  для трех указанных значений температуры отражены на рисунке 2.6. Заметно, что межмодельное различие очень существенно, и оно возрастает с увеличением скорости ветра, [46]: например, при скорости ветра 5 м/с и температуре  $t_a = -19$  °С величина  $w$ : а) по нормативной модели –  $0.069 \cdot 10^{-3}$   $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ; б) модели Саттона –  $0.42 \cdot 10^{-3}$   $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ; в) модели Кавамуры-МакКея –  $1.5 \cdot 10^{-3}$   $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , т.е. различие составляет 21.7 раза.

а)



б)



в)

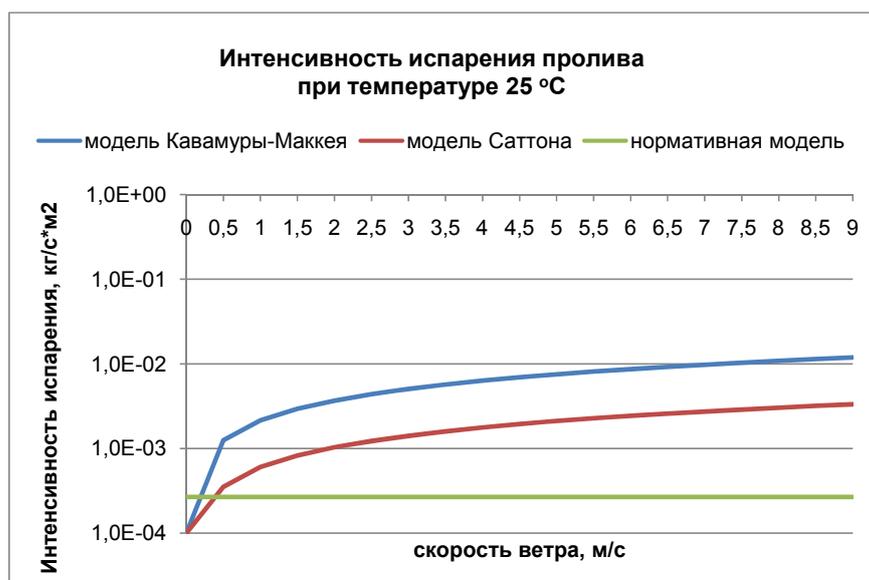


Рисунок 2.6 – Различия результатов расчета интенсивности испарения бензина по трем моделям: а)  $t_a = -19\text{ °C}$ ; б)  $t_a = 3.4\text{ °C}$ ; в)  $t_a = 25\text{ °C}$

При температуре 25 °С указанное различие увеличивается: по нормативной модели –  $0.27 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>·с; б) модели Саттона –  $2,1 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>·с; в) модели Кавамур-МакКея –  $7.5 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>·с, различие в 27.8 раза.

Приведенный пример ясно демонстрирует, насколько большой может быть модельная неопределенность, вызванная использованием альтернативных моделей.

## 2.9 Пример количественной оценки терминологической неопределенности

В качестве примера КОН терминологического типа оценим влияние трактовки параметра "длина пламени"  $L_{пл}$  пожара пролива на величину целевой метрики сценария (интенсивность падающего на объект-мишень теплового потока).

В отличие от нормативной методики МЧС РФ [61], которая однозначно трактует  $L_{пл}$  как "видимую" (в оптическом диапазоне) длину пламени, "желтая книга" TNO CPR-14E [148] допускает ее трактовку как "полной" длины пламени – длины области пространства нагретых газов, эффективно излучающей в инфракрасном диапазоне. По мнению Коули (Cowley), цитируемому [148], "видимая" длина пламени для проливов диаметром более 5 м составляет всего 30% от его "полной" длины. Таким образом, налицо терминологическая неопределенность. Оценим ее влияние на величину целевой метрики данного сценария аварии I (интенсивности падающего на объект-мишень теплового потока).

Введем обозначения:  $L_{пл}$  – видимая длина пламени,  $L_{пл.п}$  – полная длина пламени, положим  $L_{пл.п} = L_{пл}/0.3$ . Рассмотрим условную аварию – полное разрушение резервуара, содержащего 7000 кг автомобильного бензина, в результате которой образуется пятно пролива бензина с эквивалентным диаметром 24.5 м. Следовательно, по таблице П3.4 [61] светимость пламени пожара пролива составит 41 кВт/м<sup>2</sup>.

Воспользовавшись формулами (2.29) – (2.41), рассчитаем целевую метрику данного сценария I в точечной постановке. Согласно полученным нами в [54] результатам, при температуре воздуха 285 К и скорости ветра 3.5 м/с длина пламени  $L_{пл} = 29.5$  м. Следовательно, по принятому нами соглашению  $L_{пл.п} = 98.3$  м. Окончательно, для объекта-мишени, удаленной на 100 м от центра пролива, целевая метрика равна:

- а) при использовании "видимой" длины пламени  $I = 1,04$  кВт/м<sup>2</sup>;
- б) "полной" длины пламени  $I = 4,0$  кВт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, различие, обусловленное терминологической неопределенностью, в рассмотренном примере очень существенно.

## 2.10 Выводы по главе 2

1 Анализ Руководств по количественной оценке аварийного риска (риска аварий) показал, что любые результаты, полученные в рамках этой процедуры, обладают неопределенностью. Источники этой неопределенности имеют как объективную (вследствие изменчивости свойств техносферы), так и субъективную составляющие (последняя обусловлена скудностью имеющихся знаний и альтернативностью используемых моделей). Классифицируя неопределенность риска по типам, следует выделить модельный, параметрический, терминологический и вычислительный ее типы.

2 Неопределенность сопровождает все пять этапов процедуры КОР, на каждом из них имеет свои источники, подробно проанализированные в тексте главы.

3 Показано, что в общем случае модельная неопределенность представлена своими сценарным, концептуальным и аппроксимационным компонентами.

4 Для одного из сценариев аварии в главе в точечной постановке выполнена количественная оценка модельной неопределенности, обусловленной альтернативностью используемых моделей, результаты которой демонстрируют ее значительную величину.

5 Приведен пример количественной оценки терминологической неопределенности.

### ГЛАВА 3 ИНТЕРВАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНОГО РИСКА

Данная глава диссертации посвящена оцениванию параметров аварийного риска ВПОО нефтегазовой отрасли. Интервальный подход подразумевает: 1) обоснованное задание значений входных параметров задачи интервалами; 2) выполнение всех необходимых вычислений методами интервального анализа. Таким образом, интервальный подход позволяет получить прямую количественную оценку неопределенности результатов расчета – интервального числа, характеризуемую его шириной.

Из четырех известных типов неопределенности, сопровождающих процедуру КОР, в данной главе будут оцениваться только два – параметрическая и вычислительная. Примеры количественного оценивания терминологической и модельной неопределенности были приведены выше, во второй главе диссертации.

Все интервальные вычисления будут выполняться с использованием десятой версии пакета INTLAB, разработанного З.М.Румпом (S.M.Rump), [213]. С целью минимизации вычислительной неопределенности, присущей интервальным вычислениям, будут использованы методы Р.Мура, глобальной оптимизации и аффинного представления параметров.

#### **3.1 Оценка параметров взрывопожароопасных объектов, расположенных на территории склада светлых нефтепродуктов**

Рассмотрим условный склад светлых нефтепродуктов, предназначенный для приема, хранения и отпуска автомобильного бензина Аи-92, на территории которого расположены три взрывопожароопасных объекта:

- 1) резервуарный парк;
- 2) здание насосной;
- 3) сливо-наливная эстакада.

*Резервуарный парк* представляет собой огороженную забором из металлической сетки площадку с грунтовым покрытием, оборудованную наружным освещением, на территории которой находятся:

а) вертикальный цилиндрический стальной резервуар РВС-200 (диаметр  $D_{200} = 6.63$  м, высота  $h_{200} = 6,0$  м) на бетонном основании, снабженный защитной стенкой радиусом 8.3 м. Назначение стенки – предотвратить (ограничить) перелив бензина при частичном или полном разрушении резервуара;

б) четыре горизонтальных стальных резервуара РГС-75 (диаметр  $D_{75} = 3.24$  м, длина

$L_{75} = 9.0$  м) в надземном исполнении, установленные на бетонных столбиках. Группа резервуаров РГС-75 имеет общее обвалование площадью  $830 \text{ м}^2$  с защитной стенкой, предназначенной для предотвращения (ограничения) перелива бензина при частичном или полном разрушении резервуара.

*Насосная* светлых нефтепродуктов, расположенная в каменном здании размерами в плане  $6 \times 9$  м, высотой 3.3 м, с установленными в ней центробежными насосами типа 1СЦЛ 20×24 номинальной производительностью  $45 \text{ м}^3/\text{ч}$  (при частоте вращения  $1700 \text{ мин}^{-1}$ ). В здании насосной имеется помещение операторной площадью  $9 \text{ м}^2$ .

*Сливо-наливная эстакада*, включающая: а) одностороннюю двухпостовую железно-дорожную сливную эстакаду, оборудованную двумя устройствами нижнего слива УСН-150ХЛ1; б) автомобильную наливную эстакаду с автоматическим управлением и твердым покрытием на два поста.

Будем считать, что технологическое оборудование всех трех рассматриваемых ВПОО отвечает требованиям промышленной безопасности, изложенным в [94], [95]. Генеральный план склада светлых нефтепродуктов приведен в Приложении А диссертации.

Для целей логико-вероятностного моделирования аварий, качественного анализа и количественной оценки параметров аварийного риска воспользуемся модифицированными графами – дендрограммами типа "галстук-бабочка" (ДГБ), [53]. В центре такого графа расположено "головное событие" аварии; его левая часть, являясь "деревом отказов", включает события-причины возникновения аварийной ситуации на ВПОО; правая часть – "дерево событий" – возможные сценарии развития аварии. Стрела времени (показана в нижней части диаграммы), как обычно, направлена слева направо.

Графы ДГБ для взрывопожароопасных объектов рассматриваемого склада светлых нефтепродуктов изображены на рисунках 3.1 – 3.3:

- а) резервуарного парка – рисунок 3.1;
- б) насосной – рисунок 3.2;
- в) сливо-наливной эстакады – рисунок 3.3.

Диаграмма "галстук-бабочка", по сути, является таблицей, в ячейках которой в виде прямоугольников отображены события с изображением логических связей между ними. Столбцы таблицы (обозначены арабскими цифрами) назовем ярусами, строки (обозначены буквами латиницы) – уровнями. Кроме событий-прямоугольников, дерево отказов ДГБ содержит логические знаки "И" и "ИЛИ", разделяющие ярусы дендрограммы.

Вероятность событий ДГБ обозначим символами  $P_{i,j}$ , где  $i$  – номер яруса,  $j$  – уровень события на графе. Так, на рисунке 3.1  $P_{0,f}$  – вероятность узлового события,  $P_{-2,d}$  – вероятность события "частичная разгерметизация РГС-75".

Вероятности событий ДГБ могут быть рассчитаны по правилам булевой алгебры. Например, на рисунке 3.3:  $P_{-2,i} = P_{-3,i} \cdot P_{-3,j}$ ;

$$P_{-2,d} = 1 - (1 - P_{-3,b}) \cdot (1 - P_{-3,c}) \cdot (1 - P_{-3,d}).$$

С учетом того обстоятельства, что все  $P_{-3,\alpha} \ll 1$  ( $\alpha = b, c$  или  $d$ ), последнее соотношение может быть упрощено:

$$P_{-2,d} = P_{-3,b} + P_{-3,c} + P_{-3,d} + O(P_{-3,\alpha} \cdot P_{-3,\beta}) \approx P_{-3,b} + P_{-3,c} + P_{-3,d}, \quad (3.1)$$

где  $O(P_{-3,\alpha} \cdot P_{-3,\beta})$  – величина, имеющая порядок произведения  $P_{-3,\alpha} \cdot P_{-3,\beta}$ ; ( $\alpha, \beta = b, c$  или  $d$ ).

В отношении приведенных на рисунках графов важно отметить следующее:

1) подобно п.17 [88] описание на графах возможных аварий на рассматриваемом ВПОО несколько упрощено, поскольку "все многообразие возможных причин возникновения аварий" представлено в рамках данного подхода "ограниченным набором стандартизованных моделей";

2) перечень возможных сценариев аварии, указанный на рисунках 3.1 – 3.3, наиболее полон. Для некоторых вариантов головного события часть сценариев этого перечня может отсутствовать;

3) правые части ДГБ не содержат сценариев аварий, для расчета поражающих факторов которых отсутствуют нормативные методы (таких, как boil-over, внутренний взрыв в резервуаре, горение по всей поверхности резервуара и др.);

4) принято допущение, что огнепреградитель предотвращает проникновение пламени внутрь резервуара;

5) учтенные варианты головного события ДГБ обусловлены исключительно отказами элементов ВПОО как человеко-машинной системы, а не воздействием внешних факторов, подобных террористическому акту или падению летательного аппарата.

Выполнение количественных оценок в рамках метода "дерева отказов" (левой части ДГБ), возможно в случаях, когда имеется относительно полная информация о характеристиках ВПОО (параметрах надежности технологического оборудования и человека-оператора, продолжительности работы и др.).

Существенное замечание – головное (узловое) событие всех трех графов – аварийное поступление бензина в окружающую среду – показано на всех дендрограммах как единичное событие. На самом деле оно представлено серией вариантов, различающихся продолжительностью, объемом выброса и/или вероятностью. Следовательно, наиболее подходящим математическим формализмом для его полного описания является матрица, поскольку для полной характеристики каждого варианта головного события необходимо задать ряд его параметров (вероятность, объем утечки и др.), каждый из которых, в свою очередь, может принимать несколько значений.

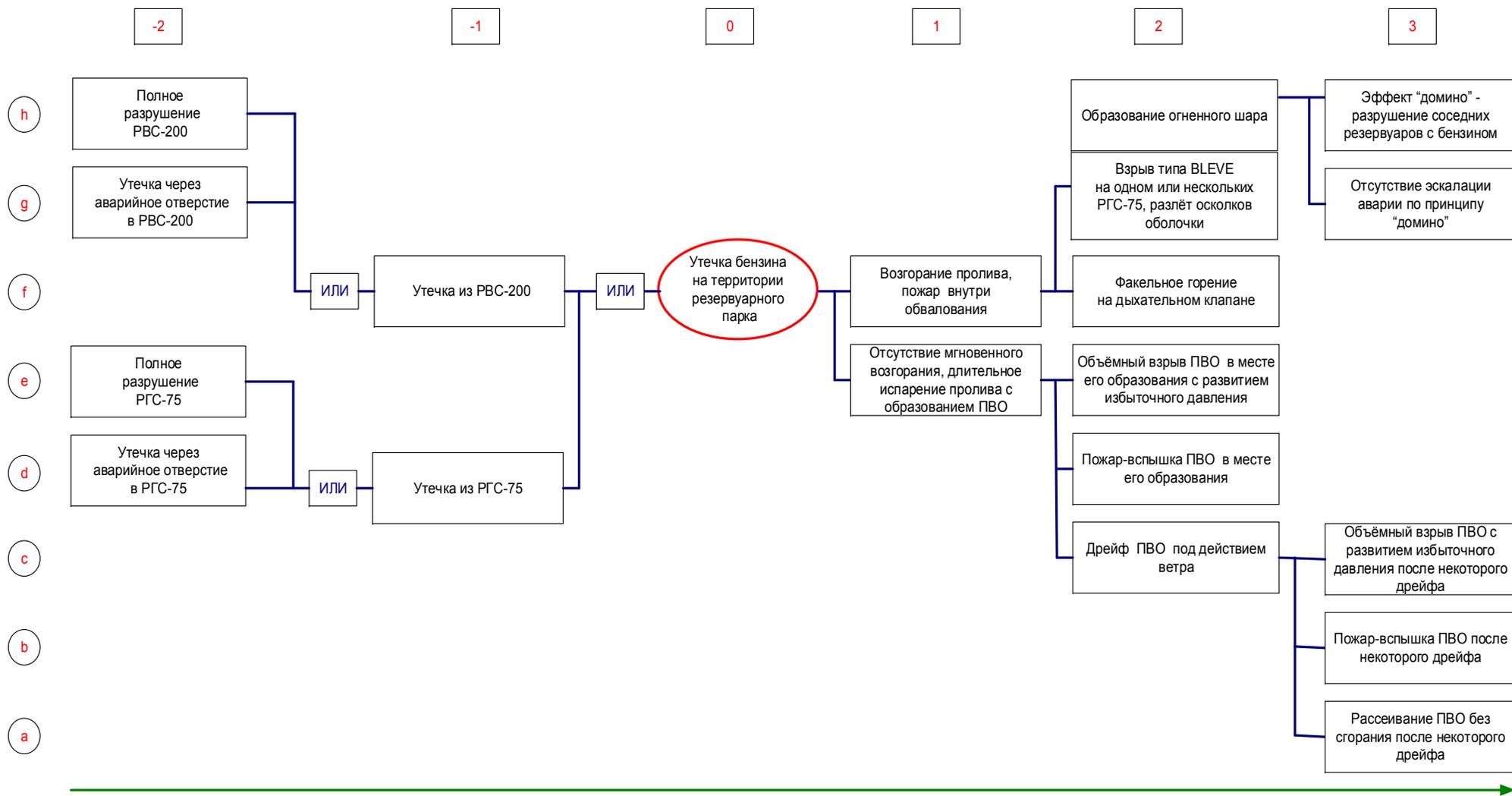


Рисунок 3.1 – ДГБ аварии на территории резервуарного парка светлых нефтепродуктов

Примечание: \* ПВО – облако ТВС

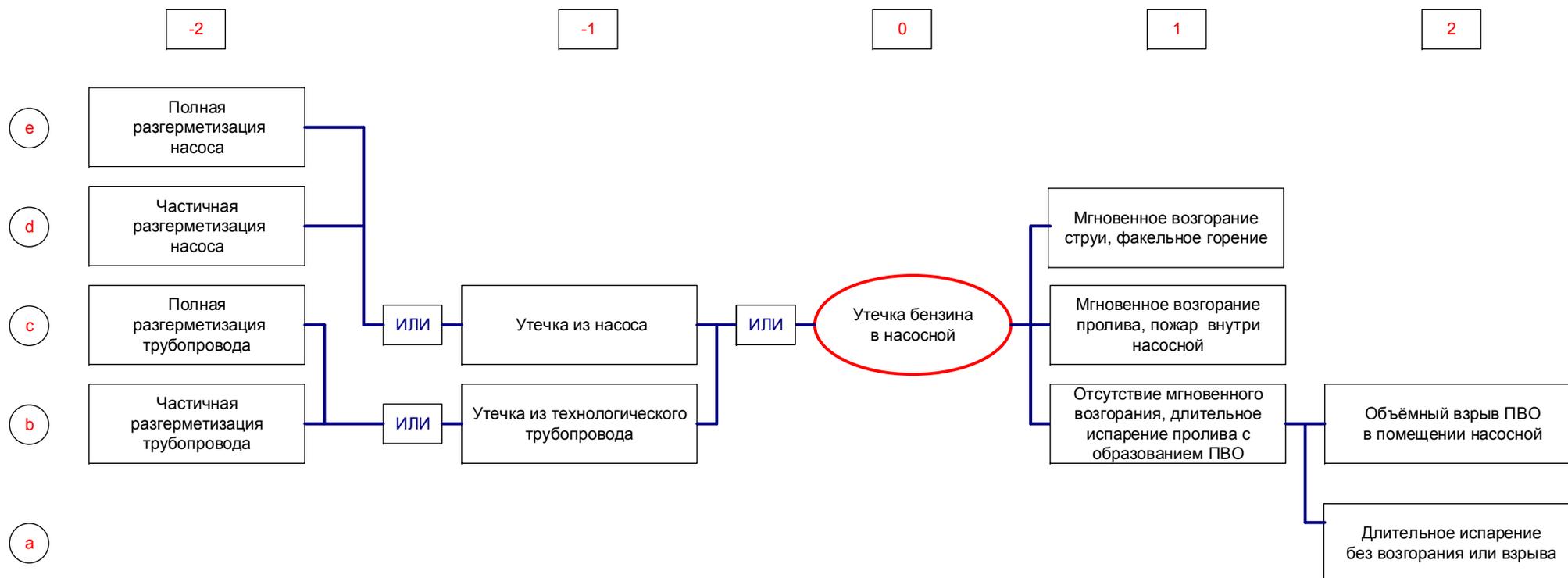


Рисунок 3.2 – ДГБ аварии в здании насосной светлых нефтепродуктов

Это существенно, поскольку, как показывает анализ, разным вариантам головного события соответствуют различные перечни возможных сценариев ее дальнейшего развития. В частности, эскалация аварии по механизму домино возможна только для тех вариантов головного события, которые сопровождаются большими объемами утечек. Данное обстоятельство не учтено ни в "Методических основах..." [93], ни в "Методике..." [61], ни в "Пособии по определению расчетных величин аварийного риска..." [74].

Таким образом, головное событие каждой из трех ДГБ аварии на рассматриваемом ВПОО представлено серией вариантов и является собой совокупность разномасштабных и разноразмерных событий.

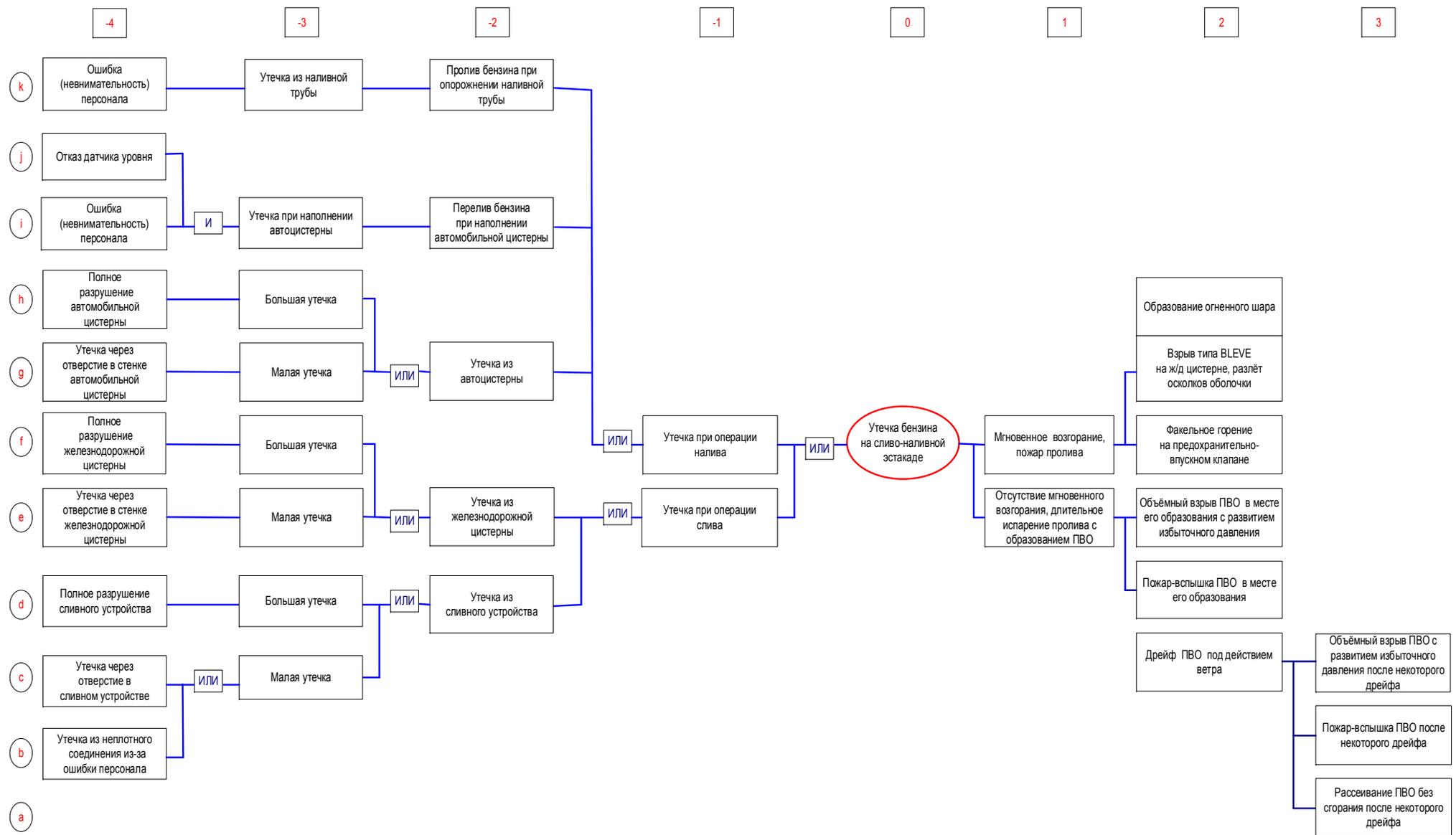


Рисунок 3.3 – ДГБ аварии на территории сливо-наливной эстакады светлых нефтепродуктов

## 3.2 Оценка параметров аварии на территории склада светлых нефтепродуктов

### 3.2.1 Оценка параметров аварии на территории

#### ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов"

Согласно рисунку 3.1 на рассматриваемом объекте возможны четыре варианта головного события (ГС) (события  $-2,h$ ;  $-2,g$ ;  $-2,e$ ;  $-2,d$ ). Учитывая оценки, выполненные во второй главе диссертации и наличие четырех одинаковых резервуаров РГС-75, получим интервальные оценки вероятности этих вариантов, год<sup>-1</sup>:  $P_{-2,h} \in [1, 2] \cdot 10^{-3}$ ,  $P_{-2,g} [2, 5] \cdot 10^{-4}$ ;  $P_{-2,e} \in [4, 8] \cdot 10^{-5}$ ,  $P_{-2,d} \in [4, 8] \cdot 10^{-4}$ .

Вторым параметром ГС является объем пролива бензина на подстилающую поверхность, третьим – площадь пролива. Их количественные оценки могут быть выполнены с использованием рекомендованных: а) моделей истечения; б) продолжительности процесса. В качестве модели истечения флюида через аварийное отверстие используем расчетные соотношения, рекомендованные методическими документами МЧС России или Ростехнадзора.

Наличие в задаче параметрической неопределенности учтем заданием численных значений входных параметров модели интервалами:

- начальный объем хранения бензина  $V_{xp}$ , м<sup>3</sup>. Учитывая, что по технологическим соображениям количество бензина  $V_{xp}$  в РВС-200 не может быть менее 30% вместимости резервуара, принимаем  $V_{xp,200} \in [60, 200]$ , м<sup>3</sup>. С учетом площади основания резервуара начальная высота уровня бензина в нем  $h_{0,200}$ , м. Согласно расчету, выполненному в INTLAB,  $h_{0,200} \in [1.74, 5.79]$  м.

Для резервуара РГС-75 аналитическая зависимость объема хранения  $V_{xp,75}$  от высоты начального уровня бензина  $h_{0,75}$  относительно его нижней точки (см. рисунок 3.4) для  $0 \leq \alpha \leq \pi$  (в пренебрежении объемом конических днищ\* такова:

$$V_{xp,75} = L_{75} \cdot R_{75}^2 \cdot [\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha]. \quad (3.2)$$

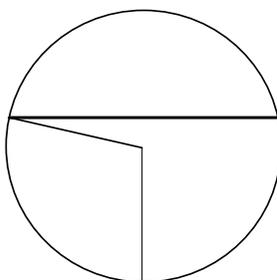


Рисунок 3.4 – Вертикальное сечение РГС-75

\* совокупный объем конических днищ РГС-75 с учетом радиуса ( $R_{75} = 1.62$  м) и высоты конуса ( $h_{дн} = 0.32$  м) равен  $\frac{2}{3} \pi \cdot R_{75}^2 \cdot h_{дн} = 1.76$  м<sup>3</sup>, что составляет около 2.3% вместимости резервуара.

Высоте начального уровня в РГС-75  $h_{0.75}$  относительно нижней точки  $h_{0.75} \in [0.1, 2.9]$  м соответствует угол  $\alpha \in [0.35, 2.48]$  рад. Трехкратное вхождение параметра  $\alpha$  в расчетное соотношение (3.2) при попытке прямого расчета соответствующего объема хранения бензина приводит к резкому уширению результата – вплоть до отрицательных значений. В данном случае для уменьшения вычислительной неопределенности воспользуемся аффинным представлением интервального числа, реализованным в INTLAB (процедура `affari`). Результат расчета –  $V_{xp.75} \in [0.68, 70.1]$  м<sup>3</sup> (без учета объема конических днищ). Относительно подстилающей поверхности высота начального уровня бензина в РГС-75  $h'_{01.75} \in [0.3, 3.1]$  м;

- температура атмосферного воздуха  $T_a$ . К сожалению, физико-математические модели аварийных процессов, содержащиеся в Руководствах по пожарной и промышленной и безопасности, не содержат указаний на область их применимости. В частности, неясен вопрос с моделированием растекания горючих жидкостей вследствие аварии по подстилающей поверхности, покрытой снегом. Учитывая это, а также соображения консервативности, в качестве расчетного диапазона принимаем положительные температуры воздуха  $t_a \in [0, 26]$  °С, или  $T_a \in [273, 299]$  К (верхняя граница интервала соответствует летней температуре 95-ти процентной обеспеченности для Марий Эл (г.Йошкар-Ола) согласно данным СП 131.13330.2012 [105]);

- диапазон скорости ветра  $u_w$ . По данным ГУ "Марийский ЦГМС" значение скорости ветра 95-ти процентной обеспеченности для Марий Эл (г.Йошкар-Ола) составляет 9 м/с. Следовательно, полагаем  $u_w \in [0, 9]$  м/с;

- плотность жидкой фазы бензина Аи-92  $\rho_{ж}$ , кг/м<sup>3</sup>. Отечественные стандарты [22], [25] приводят для его плотности при температуре 15 °С диапазон 720 ÷ 780 кг/м<sup>3</sup>. Однако для конкретного склада нефтепродуктов, получающего бензин определенного нефтеперегонного завода, этот интервал существенно уже, принимаем  $\rho_{ж15} \in [735, 765]$  кг/м<sup>3</sup>. С учетом коэффициента объемного расширения бензина  $\xi = 0,00124$  К<sup>-1</sup> в рассматриваемом диапазоне температур:

$$\rho_{ж}(T) = \rho_{ж15} \cdot [1 - \xi \cdot (T_a - 288)]. \quad (3.3)$$

Для расчета этой зависимости предварительно по методу Р.Мура разобьем интервал  $T_a$  на 26 подинтервалов шириной 1 К, тогда в уравнении (3.3) параметр  $T_a$  будет задан 26-ти компонентным интервальным вектором (брусом). Расчет дает значение плотности жидкой фазы бензина также в виде 26-ти компонентного бруса, интервальная оболочка которого составляет интервал  $\rho_{ж} \in [725.0, 779.2]$  кг/м<sup>3</sup>.

Остальные внешние параметры расчетной модели будут представлены вырожденными интервалами (скалярными числами):

- ускорение свободного падения  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ ;
- молярный объем  $V_{\mu} = 22.4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ;
- коэффициент растекания бензина по подстилающей поверхности  $f_p = 20 \text{ м}^{-1}$ .

При полном разрушении резервуара РВС-200, или РГС-75 (события -2, h; -2, e) объем пролива бензина будет равен объему хранения на момент аварии:

- а) полное разрушение РВС-200  $V_{\text{пр.200.п}} \in [60, 200] \text{ м}^3$ ;
- б) РГС-75  $V_{\text{пр.75.п}} \in [0.68, 70.1] \text{ м}^3$ .

Площадь пролива внутри обвалования зависит от того, будет ли пролив ограниченным, или нет. Предельное значение площади пролива в случае полного разрушения (ограниченный пролив) равно площади обвалования: а) РВС-200 –  $216,4 \text{ м}^2$ ; б) РГС-75 –  $830 \text{ м}^2$ .

Если принять продолжительность процесса квазимгновенного разрушения  $\tau_{\text{разр}}$  равной 1 с, то для среднего массового расхода  $q_{\text{разр}}$  получаем оценку

$$q_{\text{разр200,75}} = \frac{m_{200,75}}{\tau_{\text{разр}}}, \text{ кг/с.} \quad (3.4)$$

Как показано во второй главе диссертации, для расчета массового расхода неvisкпаяющих (третьей категории по В.Маршаллу [58]) жидкостей через малое аварийное отверстие (события -2, g; -2, d) можно воспользоваться уравнением (2.1). С учетом наличия у резервуаров газоуравнительной аппаратуры второе слагаемое под радикалом в рассматриваемом случае равно 0.

Величина гидростатического уровня  $H_{\text{ж}}$  определяется высотой зеркала бензина в резервуаре над аварийным отверстием. Согласно статистическим данным малые аварийные отверстия (свищи) в резервуарах наиболее часто образуются в районе уторного шва (для резервуаров типа РВС) и сливных патрубков. Следовательно, будем считать, что  $H_{\text{ж0}}$  примерно соответствует начальному уровню бензина в резервуаре:  $H_{\text{ж0.200}} \in [1.74, 5.79] \text{ м}$ ,  $H_{\text{ж0.75}} \in [0.1, 2.9] \text{ м}$ .

Уравнение баланса несжимаемой жидкости в резервуаре ведет к обыкновенному дифференциальному уравнению (ОДУ), которое в постановке Коши выглядит так:

а) для РВС-200:

$$\frac{dV_{200}}{dt} = - \frac{\sigma \cdot S_{\text{отв}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot V_{200}}}{\sqrt{S_{200}}}, \quad (3.5a)$$

где  $S_{200} = \pi \cdot R_{200}^2$  – площадь основания РВС-200, м<sup>2</sup>;

при начальном условии  $V_{200} = S_{200} \cdot h_{0,200}$  при  $t = 0$ ;

б) РГС-75: вспоминая, что  $\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt}$ , получаем из (3.2):

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\sigma \cdot S_{\text{отв}}}{2 \cdot L_{75} \cdot \sin^2 \alpha} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (1 - \cos \alpha)}{R_{75}^3}}, \quad (3.56)$$

где  $\alpha = \arccos(1 - h/R_{75})$ , при начальном условии  $\alpha_0 = 1 - h_0/R_{75}$  при  $t = 0$ .

Пределы интегрирования принимаем равными продолжительности утечки при ручной ликвидации аварии, которая, согласно Руководствам по пожарной безопасности, равна 300 с. Тогда после интегрирования средствами INTLAB (решатель ode45) получаем оценку совокупного объема вытекшего бензина через отверстие 10 – 25 мм:

а) для РВС-200 –  $V_{y,200.10} \in [0.08, 0.15]$  м<sup>3</sup>;

б) для РГС-75 –  $V_{y,75.10} \in [0.02, 0.11]$  м<sup>3</sup>.

С учетом принятого коэффициента растекания площадь пролива составит незначительную величину:

а) для РВС-200  $S_{\text{пр},200.10} \in [1.7, 3.0]$  м<sup>2</sup>; б) для РГС-75  $S_{\text{пр},75.10} \in [0.39, 2.1]$  м<sup>2</sup>.

Можно принять, что величина массового расхода бензина через аварийное отверстие  $q$ , кг/с, в течение 300 секунд меняется мало. Для учета температурной зависимости она может быть представлена 26-ти компонентным вектором (брусом).

Итак, параметры вариантов головного события аварии на территории резервуарного парка нами полностью оценены:

Таблица 3.1 – *Параметры вариантов головного события аварии на территории резервуарного парка склада нефтепродуктов*

Вариант ГС /параметр	-2,h	-2,g	-2,e	-2,d
Вероятность $P$ , год <sup>-1</sup>	$[1, 2] \cdot 10^{-3}$	$[2, 5] \cdot 10^{-4}$	$[4, 8] \cdot 10^{-5}$	$[4, 8] \cdot 10^{-4}$
Объем утечки $V_y$ , м <sup>3</sup>	[60, 200]	[0.08, 0.15]	[0.68, 70.1]	[0.02, 0.11]
Площадь пролива $S_{\text{пр}}$ , м <sup>2</sup>	[216.4, 216.4]	[1.7, 3.0]	[13.6, 830]	[0.39, 2.1]

### 3.2.2 Оценка параметров аварии на ВПОО "Насосная светлых нефтепродуктов"

Дендрограмма рисунка 3.2 также содержит четыре варианта головного события аварии (события -2,e; -2,d; -2,c; -2,b). С учетом оценок второй главы диссертации, общей эквивалентной длины технологических трубопроводов внутри насосной (с учетом фланцевых со-

единений) 105 м и продолжительности ее работы 700 ч/год, интервальные оценки вероятности ГС, год<sup>-1</sup>:  $P_{-2,e} \in [1, 2] \cdot 10^{-4}$ ,  $P_{-2,d} \in [5, 6] \cdot 10^{-4}$ ;  $P_{-2,c} \in [0.5, 3.1] \cdot 10^{-5}$ ,  $P_{-2,b} \in [2.1, 3.1] \cdot 10^{-5}$ .

*Вариант ГС -2,e* (полная разгерметизация насоса) – согласно принятому нами условию рассматриваемый склад нефтепродуктов отвечает современным требованиям промышленной безопасности [95]. Его насосная оборудована, в том числе, автоматическими отсекающими устройствами, на полу смонтированы дренажные лотки, закрытые металлическими листами. После образования в насосе отверстия диаметром 50 мм объемный расход утечки будет равен производительности насоса. Приняв постоянную времени автоматики равной 12 с, а производительность насоса равной интервалу [43, 45] м<sup>3</sup>/ч, или [0.012, 0.013] м<sup>3</sup>/с, оценим объем утечки:  $V_y \in [0.012, 0.013] 12 = [0.14, 0.16] \text{ м}^3$ . Ввиду наличия на полу насосной дренажных лотков площадь пролива будет равна площади пола насосного зала  $S_{\text{пр}} = 44 \text{ м}^2$ .

*Варианты ГС -2,d; -2,b* (частичная разгерметизация насоса или трубопровода). Для расчета объемного расхода бензина через малое отверстие (диаметром 10 мм) в корпусе насоса (либо в трубе) воспользуемся моделью истечения, рекомендованной Руководством по безопасности [91]. Номинальный напор, создаваемый насосным агрегатом, составляет 54 м вод. ст., или 530 кПа.

Величина  $P_{\text{н}}$  равна гидростатическому давлению бензина в наполняемом/разгружаемом резервуаре,  $\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h_0$ , где плотность, вообще говоря, является 26-ти компонентным вектором (брусом), компоненты которого зависят от температуры воздуха. Для резервуаров склада, как и ранее,  $h_0 \in [0.3, 5.8] \text{ м}$ . С учетом габаритов четырехосной железнодорожной цистерны, предназначенной для перевозки светлых нефтепродуктов, ее расположения во время слива на повышенном тупике, принимаем высоту уровня бензина  $h_{\text{жц},0}$  в ней относительно земной поверхности  $h_{\text{жц},0} \in [2.2, 4.8] \text{ м}$ . Окончательно, гидростатическое давление  $P_{\text{н}} \in [0.22, 4.2] \cdot 10^4 \text{ Па}$ ;

Величина  $P_{\text{к}}$  равна гидростатическому давлению уровня бензина в "конечном" резервуаре. Аналогичные соображения приводят к оценке давления  $P_{\text{к}} \in [0.22, 4.2] \cdot 10^4 \text{ Па}$ ;

Длина трубопровода  $L_1$  от разгружаемого резервуара до места отверстия, в интервальной постановке равна:

- [18, 22] м – при сливе ж/д цистерн;
- 27 м – при отпуске бензина из РВС-200;
- [32, 49] м – при отпуске бензина из РГС-75. В итоге принимаем  $L_1 \in [18, 49] \text{ м}$ .

Аналогично,  $L_2$  – длина трубопровода от места отверстия до наполняемого резервуара, равна:

- 27 м – до РВС-200;
- [32, 49] м – до РГС-75;
- [43, 48] м – до автоналивной эстакады. В итоге принимаем  $L_2 \in [27, 49]$  м.

Задав шероховатость  $\Delta_3$  стальных труб диаметром  $d = 150$  мм величиной  $\Delta_3 = 0.1$  мм и приравняв скорость движения жидкости к скорости в ситуации с неповрежденной трубой, при принятом расходе насоса [43, 47] м<sup>3</sup>/ч и кинематической вязкости бензина Аи-92  $\zeta_{ж} = 0.65$  сСт =  $6.5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, получим предварительную оценку числа Рейнольдса для данного потока  $Re \in [1.56, 1,63] \cdot 10^5$ .

Для исключения повторного вхождения параметра  $d$  преобразуем (2.7):

$$\lambda_{пр}(u) = \frac{0.11}{d^{0.25}} \cdot \left( \Delta_3 + \frac{68 \cdot \zeta_{ж}}{u} \right)^{0.25}. \quad (3.6)$$

Подставив в (3.6) вышеуказанные значения, получаем оценку  $\lambda_{пр} \in [0.0198, 0.02]$ . Одновременно в таблице С. 87 справочника И.Е.Идельчика [36] находим для рассматриваемого случая (течение в трубах с равномерной шероховатостью) несколько меньшие значения  $\lambda_{пр} \in [0.015, 0.016]$ . В итоге принимаем для  $\lambda_{пр}$  точечную оценку  $\lambda_{пр} = 0.018$ .

Учитывая, что рассматриваемый отрезок трубопровода не может считаться "длинным" (условие  $L/d \gg 1000$  не соблюдается), следует учесть наличие в нем местных сопротивлений (задвижек, клапанов, поворотов и др.). По [36] принимаем суммарный коэффициент местных гидравлических потерь равным  $\lambda_{м} = 4.5$ , в том числе  $\lambda_{м.до} = 2.0$ ,  $\lambda_{м.после} = 2.5$ .

Малое отверстие в стенке трубопровода в пределах насосного зала может образоваться как со стороны всаса насоса, так и со стороны его нагнетания. Если отверстие образуется со стороны всаса, будет иметь место безнапорное истечение бензина под действием гидростатического напора опорожняемого резервуара.

Решение системы нелинейных уравнений (2.5а-е) позволит найти искомую величину массового расхода бензина из малого аварийного отверстия в стенке трубопровода. Как известно, существуют эффективные итерационные методы решения систем нелинейных уравнений (Ньютона, Кравчука и др.). В литературе по интервальному анализу, например, [128], [201], [204] показано, что в интервальной постановке эти методы обеспечивают гарантированное нахождение всех корней СНЛАУ.

В современных программных пакетах математического анализа (типа MATLAB) реализованы алгоритмы автоматического дифференцирования, что избавляет их пользователей при решении систем уравнений от необходимости вычисления якобианов соответ-

вующих матриц. В частности, INTLAB использует для этой цели модифицированный З.М.Румпом метод Кравчука, реализованный в процедурах `verifynlssparam` и `verifynlssall`. Данные процедуры способны относительно быстро решать СНЛАУ.

Свободное (безнапорное) истечение бензина из резервуара через малое отверстие будет квазистатическим (потери на трение можно не учитывать), так что система уравнений (2.6а-е) сведется к единственному уравнению (2.4). При принятой величине начального давления  $P_n$  результат расчета массового расхода  $G_{\text{выб}} \in [0.085, 0.37]$  кг/с. Следовательно, объем утечки бензина за 12 с составит незначительную величину  $[0.0014, 0.006]$  м<sup>3</sup>.

В случае образования малого отверстия в трубопроводе в пределах насосного зала со стороны нагнетания насоса следует решать систему уравнений (2.6а-е). При этом следует учесть, что насосный агрегат обеспечивает подачу бензина в трубопровод с экономически оправданной для данного диаметра скоростью  $u_{\text{до}} = 0.67$  м/с (номинально [43, 45] м<sup>3</sup>/ч), или  $G_{\text{до}} \in [8.7, 9.3]$  кг/с.

Из гидродинамики известно, что напор насоса  $P_n$  равен гидростатическому давлению из-за разницы уровней жидкости в разгружаемом и наполняемом резервуарах плюс суммарные гидравлические потери. Ввиду малой длины участка трубопровода от насоса до аварийного отверстия гидравлическими потерями на этом отрезке пренебрежем. В таком случае в системе уравнений (2.6) останется четыре нелинейных уравнения:

$$\Delta h_{\text{рез}} \cdot g \cdot \rho_{\text{ж}} = \left[ \left( \lambda_{\text{пр}} \cdot \frac{L_2}{d} + \lambda_{\text{м.после}} \right) \cdot u_{\text{после}}^2 + \left( \lambda_{\text{пр}} \cdot \frac{L_1}{d} + \lambda_{\text{м.до}} \right) \cdot u_{\text{до}}^2 \right] \cdot \frac{\rho_{\text{ж}}}{2}, \quad (3.7a)$$

$$G_{\text{выб}} = 0.6 \cdot S_{\text{отв}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot P_{\text{разр}}}, \quad (3.7б)$$

$$G_{\text{выб}} = G_{\text{до}} - G_{\text{после}}, \quad (3.7в)$$

$$G_{\text{после}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot u_{\text{после}}}{4}, \quad (3.7г)$$

с четырьмя неизвестными  $u_{\text{после}}$ ,  $G_{\text{выб}}$ ,  $G_{\text{после}}$ ,  $P_{\text{разр}}$  (избыточное давление в сечении отверстия). Здесь  $\Delta h_{\text{рез}}$  – разница высот уровней бензина в резервуарах, м.

Известная величина  $u_{\text{после}}$  позволяет по (3.7г) легко найти  $G_{\text{после}}$ .

Решение системы уравнений (3.7а-г) может быть найдено в INTLAB с помощью `verifynlssparam`. Есть и альтернативный способ – подставляя в качестве  $\Delta h_{\text{рез}}$  и  $L_1 + L_2$  значения границ их интервалов, с помощью процедуры `verifynlssall` INTLAB получаем корни системы уравнений (3.7а-г), представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – *Корни системы уравнений (3.7) для различных значений коэффициентов*

Параметр	$\Delta h_{\text{рез}} = 5.5 \text{ м}$ $\Sigma L = 45 \text{ м}$	$\Delta h_{\text{рез}} = 0 \text{ м}$ $\Sigma L = 45 \text{ м}$	$\Delta h_{\text{рез}} = 5.5 \text{ м}$ $\Sigma L = 98 \text{ м}$	$\Delta h_{\text{рез}} = 0 \text{ м}$ $\Sigma L = 98 \text{ м}$
$G_{\text{выб}}, \text{ кг/с}$	0.37	0.073	0.374	0.0094
$P_{\text{разр}}, \text{ Па}$	41452	1628	42470	2671

Окончательно, в качестве величины массового расхода бензина при утечке из малого отверстия принимаем  $G_{\text{выб}} \in [0.0094, 0.374] \text{ кг/с}$ , которой соответствует объем пролива за 12 с  $V_y \in [0.00015, 0.0061] \text{ м}^3$ .

Заметно, что влияние разницы высот уровней бензина в резервуарах на величину  $G_{\text{выб}}$  существенно сильнее, чем влияние длины трубопровода. Объединим варианты утечки через малое аварийное отверстие, расположенное "до" и "после" насоса: а) массовый расход,  $G_{\text{выб}} \in [0.0094, 0.374] \text{ кг/с}$ ; б) объем пролива  $V_y \in [0.00015, 0.0061] \text{ м}^3$ .

Принимая, что 1 л бензина при проливе на бетонированную (стальную) поверхность образует пятно площадью  $1 \text{ м}^2$ , при утечке  $V_y$  площадь пролива составит  $S_{\text{пр}} \in [0.15, 6.1] \text{ м}^2$ .

*Вариант ГС -2,с* (разгерметизация трубопровода гильотинного типа). Величина объемного расхода и объем утечки различаются для случаев образования отверстия со стороны всаса и нагнетания насоса (в пределах помещения насосной). Параметры ГС аварии для случая отверстия со стороны нагнетания насоса аналогичны варианту -2,е – объемный расход  $[0.012, 0.013] \text{ м}^3/\text{с}$ , объем пролива  $[0.14, 0.16] \text{ м}^3$ , площадь пролива  $44 \text{ м}^2$ .

При гильотинном обрыве трубопровода со стороны всаса будет наблюдаться безнапорное истечение бензина из резервуара через отрезок трубопровода. С учетом малой продолжительности утечки можно рассмотреть квазистационарный случай (уровень бензина в резервуаре практически не меняется). Система уравнений (2.6а-е) в данном случае сведется к единственному уравнению

$$h_{0\text{рез}} \cdot g \cdot \rho_{\text{ж}} = \left( \lambda_{\text{пр}}(u) \cdot \frac{L_1}{d} + \lambda_{\text{м}} \right) \cdot \frac{u^2 \cdot \rho_{\text{ж}}}{2}, \quad (3.8)$$

Как и ранее, величина массового расхода  $G_{\text{выб}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot u}{4}$ , кг/с.

Расчет по (3.8) дал величину массового расхода  $G_{\text{выб}} \in [0.053, 0.38] \text{ кг/с}$ .

Тогда объем утечки за 12 с составит  $V_y \in [0.00086, 0.0062] \text{ м}^3$ , что даст пятно площадью  $S_{\text{пр}} \in [0.86, 6.2] \text{ м}^2$ .

Итоговые результаты оценок параметров головного события аварии в насосной представлены в таблице 3.3. Обращает на себя внимание обстоятельство, что ряд пара-

метров ГС (-2,с) представлен *мультиинтервалами* (объединением двух или более непесекающихся интервалов).

Таблица 3.3 – *Параметры вариантов головного события аварии в здании насосной склада нефтепродуктов*

Вариант ГС /параметр	-2,е	-2,d	-2,с	-2,b
Вероятность P, год <sup>-1</sup>	[1, 2]·10 <sup>-4</sup>	[5, 6]·10 <sup>-4</sup>	[0.5, 3.1]·10 <sup>-5</sup>	[2.1, 3.1]·10 <sup>-5</sup>
Объем утечки V <sub>y</sub> , м <sup>3</sup>	[0.14, 0.16]	[0.00015, 0.006]	[0.00086, 0.0062] [0.14, 0.16]	[0.00015, 0.006]
Площадь пролива S <sub>пр</sub> , м <sup>2</sup>	44	[0.15, 6.2]	[0.86, 6.2] 44	[0.15, 6.1]

### 3.2.3 Оценка параметров аварии на территории ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов"

Левая часть дендрограммы рисунка 3.3 содержит девять вариантов головного события аварии (ярус -3), различающихся вероятностью и/или масштабом. Прежде оценки вероятности этих событий оценим вероятности событий яруса -4 ДГБ:

$P_{-4,b}$ , или  $P_{-4,i}$ , или  $P_{-4,k}$  – как известно, роль человеческого фактора как причины аварий очень значима, однако отечественные Руководства по КОР не содержат рекомендаций по оценке вероятности ошибок человека. В этой связи воспользуемся интервалом  $P_{-4,k} \in [0.003, 0.0045]$  из монографии П.Г.Белова [5].

Далее, с учетом оценок, полученных во второй главе диссертации:

$P_{-4,c}$ ,  $P_{-4,d}$  – при интенсивности отказов  $[2, 4] \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$  и общей продолжительности операции слива 950 ч/год, интервальная оценка вероятности  $P_{-4,c,d} \in [1.9, 3.8] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

$$P_{-4,e}, P_{-4,g} \in [3, 7] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1};$$

$$P_{-4,f}, P_{-4,h} \in [0.75, 1.5] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1};$$

$P_{-4,j}$  – таблица П2.2 [5] приводит точечное значение  $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$  интенсивности отказа емкостных датчиков уровня. Приняв в качестве ее интервальной оценки  $\lambda \in [2.0, 3.0] \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ , а общей продолжительности наливных операций – 2100 ч/год, получим интервальную оценку вероятности  $P_{-4,j} \in [0.042, 0.063] \cdot \text{год}^{-1}$ .

Таким образом, вероятности всех девяти вариантов головного события аварии на рассматриваемом ВПОО оценены нами следующим образом:

*вариант -3,с* представлен двумя событиями равного масштаба – утечкой с различными вероятностями: *вариантом -3,b* – с вероятностью  $P_{-3,b} \in [0.003, 0.0045] \text{ год}^{-1}$  и *вариантом -3,с* – с вероятностью  $P_{-3,c} \in [1.9, 3.8] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

вариант -3,d – с вероятностью  $P_{-3,d} \in [1.9, 3.8] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

вариант -3,e – с вероятностью  $P_{-3,e} \in [3, 7] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

вариант -3,f – с вероятностью  $P_{-3,f} \in [0.75, 1.5] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

вариант -3,g – с вероятностью  $P_{-3,g} \in [3, 7] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

вариант -3,h – с вероятностью  $P_{-3,h} \in [0.75, 1.5] \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;

вариант -3,i – с вероятностью  $P_{-4,j} \cdot P_{-4,i} = P_{-3,i} \in [1.2, 2.8] \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ ;

вариант -3,k – с вероятностью  $P_{-3,k} \in [0.003, 0.0045] \text{ год}^{-1}$ .

Теперь оценим параметры ГС, характеризующие его масштаб.

*Варианты -3,b, -3,c – малая утечка* – в качестве эквивалентного диаметра аварийного отверстия примем 10 мм. В данных вариантах ГС будет иметь место аварийная утечка бензина через малое отверстие в трубе при самотечном его сливе из цистерны, описываемая в квазистатическом приближении уравнением (2.1). Избыточное гидростатическое давление создается бензином в железнодорожной цистерне с отметками уровня  $h_{0ц} \in [2.2, 4.8] \text{ м}$ . С учетом зависимости плотности бензина от температуры результат расчета массового расхода  $G_{\text{выб}}$  является 26-ти компонентным брусом с интервальной оболочкой  $G_{\text{выб}} \in [0.22, 0.36] \text{ кг/с}$ . В рамках используемой модели объем и площадь пролива от температуры не зависят:  $V_y \in [0.093, 0.14] \text{ м}^3$ ,  $S_{\text{пр}} \in [1.86, 2.74] \text{ м}^2$ .

*Вариант -3,d, большая утечка* – аналогичная ситуация, однако истечение происходит через отверстие, сечение которого равно полному сечению сливного устройства. Подобный процесс исследован нами ранее в варианте -2,d ГС аварии на территории резервуарного парка.

С учетом габаритов резервуара железнодорожной цистерны типа 15-869 результат решения соответствующего ОДУ: объем пролива за 300 с  $V_y \in [0, 22.2] \text{ м}^3$ , что соответствует площади пятна  $S_{\text{пр}} \in [0, 444] \text{ м}^2$ . Массовый расход  $G_{\text{выб}}$  бензина при данном варианте ГС с учетом зависимости плотности бензина от температуры есть 26-ти компонентный вектор с интервальной оболочкой  $G_{\text{выб}} \in [0, 57.7] \text{ кг/с}$ .

*Вариант -3,e, малая утечка* – подобен соответствующему варианту -2,d. Параметры, характеризующий масштаб ГС, те же:  $G_{\text{выб}}$  является 26-ти компонентным брусом с интервальной оболочкой  $G_{\text{выб}} \in [0.22, 0.36] \text{ кг/с}$ ,  $V_y \in [0.093, 0.14] \text{ м}^3$ ,  $S_{\text{пр}} \in [1.86, 2.74] \text{ м}^2$ .

*Вариант -3,f – большая утечка* – геометрическая вместимость котла железнодорожной цистерны проекта 15-869 составляет  $88.6 \text{ м}^3$ . Максимально допустимая степень его наполнения  $\eta$  при наливе согласно "Правилам..." [81] определяется разницей температур  $\Delta t$  (максимально-допустимой  $t_m$  и налива  $t_n$ ) и коэффициентом объемного расширения жидкости:

$$\eta = \frac{1}{1 + \zeta \cdot \Delta t}. \quad (3.9)$$

Приняв  $\Delta t \in [10, 50]$  °С, получаем по (3.9) интервальную оценку объема пролива (равного содержанию бензина в железнодорожной цистерне)  $V_y \in [0, 87.5]$  м<sup>3</sup>, которому соответствует площадь пролива  $S_{пр} \in [0, 1750]$  м<sup>2</sup>.

*Вариант -3,g* отличается от вариантов -3,b и -3,c характеристиками автомобильной цистерны. Перевозки бензина автотранспортом со склада осуществляются односекционными автоцистернами АЦ-20 на шасси КАМАЗ, Урал, МАЗ, имеющими эквивалентный диаметр 2,25 м и длину 5 м. В качестве уровня бензина в резервуаре АЦ-20 примем интервал  $h_{0АЦ} \in [0, 2.2]$  м. Тогда, согласно уравнению (3.9) с учетом зависимости плотности бензина от температуры результат расчета массового расхода  $G_{выб}$  является 26-ти компонентным брусом с интервальной оболочкой  $G_{выб} \in [0, 0.24]$  кг/с. Объем и площадь пролива от температуры не зависят:  $V_y \in [0, 0.09]$  м<sup>3</sup>,  $S_{пр} \in [0, 1.86]$  м<sup>2</sup>.

*Вариант -3,h* – объем пролива  $V_y \in [0, 20]$  м<sup>3</sup>, соответствующая площадь пролива  $S_{пр} \in [0, 400]$  м<sup>2</sup>.

*Вариант -3,i* – утечка прекращается вручную прекращением работы насоса оператором насосной. Приняв продолжительность утечки равной 300 с, получаем объем пролива  $V_y \in [0.012, 0.013] \cdot 300 = [3.6, 3.9]$  м<sup>3</sup>, площадь пятна  $S_{пр} \in [72, 78]$  м<sup>2</sup>. Массовый расход является 26-ти компонентным брусом с интервальной оболочкой  $G_{выб} \in [2.6, 3.1]$  кг/с.

*Вариант -3,k* – объем пролива равен внутреннему объему отрезка трубы диаметром 150 мм и длиной 4 м,  $V_y = 0.071$  м<sup>3</sup>, площадь пролива  $S_{пр} = 1.4$  м<sup>2</sup>.

Итак, параметры вариантов головного события аварии на сливо-наливной эстакаде представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – *Параметры вариантов головного события аварии на территории сливо-наливной эстакады светлых нефтепродуктов*

Вариант ГС /параметр	-3,b	-3,c	-3,d	-3,e	-3,f
Вероятность Р, год <sup>-1</sup>	$[3, 4.5] \cdot 10^{-3}$	$[1.9, 3.8] \cdot 10^{-5}$	$[1.9, 3.8] \cdot 10^{-5}$	$[3, 7] \cdot 10^{-5}$	$[0.75, 1.5] \cdot 10^{-5}$
Объем утечки $V_y$ , м <sup>3</sup>	$[0.093, 0.14]$	$[0.093, 0.14]$	$[0, 22.2]$	$[0.093, 0.14]$	$[0, 87.5]$
Площадь пролива $S_{пр}$ , м <sup>2</sup>	$[1.86, 2.74]$	$[1.86, 2.74]$	$[0, 444]$	$[1.86, 2.74]$	$[0, 1750]$

Окончание таблицы 3.4

Вариант ГС /параметр	-3,g	-3,h	-3,i	-3,k
Вероятность Р, год <sup>-1</sup>	$[3, 7] \cdot 10^{-5}$	$[0.75, 1.5] \cdot 10^{-5}$	$[1.2, 2.8] \cdot 10^{-4}$	$[3, 4.5] \cdot 10^{-3}$
Объем утечки $V_y$ , м <sup>3</sup>	$[0, 0.09]$	$[0, 20]$	$[3.6, 3.9]$	$[0.071, 0.071]$
Площадь пролива $S_{пр}$ , м <sup>2</sup>	$[0, 1.86]$	$[0, 400]$	$[72, 78]$	$[1.4, 1.4]$

Переходим к количественной оценке параметров событий правой части ДГБ.

### 3.3 Оценка целевых метрик сценариев аварии на территории склада светлых нефтепродуктов

В рамках данной главы величина целевых метрик (поражающих факторов) различных сценариев аварии на рассматриваемых ВПОО (кроме насосной) будет оцениваться для условного объекта-мишени, расположенного на удалении 100 метров.

#### 3.3.1 Оценка целевых метрик сценариев аварии на территории ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов"

Согласно рисунку 3.1 после возникновения аварии возможны: а) мгновенное или отсроченное возгорание пролива; б) образование облака ТВС вследствие испарения с его поверхности.

*Сценарий аварии "Пожар пролива"*. Целевая метрика сценария – интенсивность падающего на объект-мишень теплового потока. С целью уменьшения терминологической неопределенности (ambiguity) принимаем соглашение в данном разделе и впредь считать:

а) длиной пламени (аппроксимируемого телом конической, цилиндрической или иной формы) – длину части этого тела, видимую (светящуюся) в оптическом диапазоне;

б) среднеповерхностной плотностью теплового излучения (светимостью пламени) – среднеповерхностную плотность электромагнитного излучения с длинами волн в диапазоне 0.4 – 1000 мкм (т.е. с учетом видимого диапазона);

в) скоростью ветра – среднюю скорость ветра, полученную осреднением за 10 минут (как это принято в большинстве стран, кроме США и Индии), измеренную на высоте 10 м от подстилающей поверхности;

г) расстоянием  $X$  – расстояние по горизонтали от центра пролива (основания пламени) до объекта-мишени.

Количественно неопределенность входных параметров модели зададим представлением их интервальными числами. В относительно редких случаях, когда имеет место статистическая устойчивость варьируемых параметров, полученные интервальные оценки могут быть улучшены, [45].

Все параметры модели разделим на *внешние* (характеризующие свойства опасного объекта, обращающихся в нем опасных веществ, метеорологической ситуации и т.п.) и *внутренние* (параметры самой модели, а также параметры, являющиеся результатом расчета, выполненного в ее рамках).

Природно-эксплуатационными параметрами при моделировании поражающих фак-

торов аварии "пожар пролива" являются:

- температура атмосферного воздуха  $T_a$ , К;
- диапазон скорости ветра  $u_w$ , м/с;
- относительная влажность  $R_h$  воздуха (для условий республики Марий Эл принимаем экспертно  $R_h \in [40, 100]\%$ ).

Модельные параметры:

- величина коэффициента кинематической вязкости воздуха. Как известно, вязкость идеального газа увеличивается с ростом температуры как  $T^{1/2}$ , [125]. В приближении реального газа зависимость динамической вязкости воздуха  $\psi_{\text{возд}}$  от температуры несколько сложнее и может быть аппроксимирована, например, формулой Сазерленда (справедливой в диапазоне температур 0 – 555 К и давлении не более 3.45 МПа):

$$\psi_{\text{возд}} = \psi_{0.\text{возд}} \cdot \frac{T_1 + C_{\text{саз.воз}}}{T_a + C_{\text{саз.воз}}} \cdot \left( \frac{T_a}{T_1} \right)^{3/2}, \quad (3.10)$$

где  $\psi_{\text{возд}}$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с, при расчетной температуре  $T_a$ , К;

$\psi_{0.\text{возд}}$  – динамическая вязкость воздуха при некоторой температуре  $T_1$  ( $\psi_{0.\text{возд}} = 1.83 \cdot 10^{-5}$  Па·с при  $T_1 = 291.15$  К, [127]);

$C_{\text{саз.воз}}$  – постоянная Сазерленда для воздуха, К,  $C_{\text{саз.воз}} = 111$  К, [151]. Подставив в (3.10) исходные данные, получаем интервальную оценку динамической вязкости  $\psi_{\text{возд}} \in [1.66, 2.0] \cdot 10^{-5}$  Па·с. Отметим, что в (3.10) температура воздуха входит дважды, что ведет к переоценке ширины интервала. Применив процедуру глобальной оптимизации, получим несколько улучшенный (суженный) интервальный результат  $\psi_{\text{возд}} \in [1.74, 1.87] \cdot 10^{-5}$  Па·с;

- плотность атмосферного воздуха  $\rho_v$ . Принимая по ГОСТ 4401-81 [21] плотность воздуха  $\rho_{v.\text{ст}} = 1.225$  кг/м<sup>3</sup> при  $T_{\text{ст}} = 288.15$  К. В условиях постоянного давления плотность воздуха при температуре  $T_a$ :

$$\rho_v(T_v) = \rho_{v.\text{ст}} \cdot \frac{T_{\text{ст}}}{T_a}, \quad (3.11)$$

является 26-тикомпонентным интервальным вектором с интервальной оболочкой:  $\rho_v \in [1.18, 1.29]$  кг/м<sup>3</sup>;

- кинематическая вязкость воздуха  $\nu_v = \psi_{\text{возд}}/\rho_v$  является 26-ти компонентным брусом с интервальной оболочкой  $\nu_v \in [2.1, 2.8] \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;
- среднеповерхностная плотность теплового потока (светимость поверхности пламени)  $E_f$ , кВт/м<sup>2</sup>. Нормативная методика МЧС РФ [61] предлагает определять  $E_f$  по таб-

лице ПЗ.4. Воспользовавшись третьей строкой данной таблицы и методом линейной интерполяции находим  $E_f$  для известных значений  $d_{пр}$  (таблица 3.5) четырех вариантов ГС.

Параметры смешанного типа. С учетом того, что бензин является не индивидуальным веществом, а представляет собой сложную смесь различных углеводородов и их серо-, азот- и кислородсодержащих производных, количественные оценки его теплофизических свойств являются непростой задачей. Выполним интервальные оценки параметров смешанного типа, используемых анализируемыми расчетными моделями:

- для величины молярной массы  $\mu$  летнего бензина Аи-93 Пособие [75] приводит точечное значение 98.2 кг/кмоль. Диапазон значений  $\mu$  может быть оценен по формуле Б.П.Воинова, [3], связывающей молярную массу узких бензиновых фракций и среднемолярную температуру их кипения  $t_{кип}$ :

$$\mu = 60 + 0.3 \cdot t_{кип} + 0.001 \cdot t_{кип}^2. \quad (3.12)$$

Приняв по ГОСТ Р 51105-97 [25] температурные пределы перегонки бензина 75 °С (10%) – 185 °С (90%), получаем по (3.12) соответствующий интервал  $\mu \in [88.1, 149.7]$  кг/кмоль (ввиду повторного вхождения в формулу  $t_{кип}$  потребовалось использование метода глобальной оптимизации, "наивный" расчет дал  $\mu \in [86, 196]$  кг/кмоль);

- значение теплотворной способности бензина  $\Delta H_c$ , Дж/кг. Химическая энциклопедия [129] приводит интервал  $\Delta H_c \in [41, 44] 10^6$  Дж/кг;
- плотность жидкой фазы бензина  $\rho_{ж}$ , кг/м<sup>3</sup>, выше была оценена 26-ти компонентным брусом;
- величина плотности насыщенных паров бензина при температуре кипения и атмосферном давлении. Уравнение (ПЗ.29) [61] позволяет оценить плотность паров вещества, приведенных к атмосферному давлению при расчетной температуре  $t_{рас}$ , °С:

$$\rho_{п} = \frac{\mu}{V_{\mu} \cdot (1 + 0.00367 \cdot t_{рас})}, \quad (3.13)$$

где  $\mu$  – молярная масса вещества, кг/кмоль;

$V_{\mu}$  – молярный объем, 22.4 м<sup>3</sup>/кмоль.

Результат расчета  $\rho_{п} \in [2.4, 5.3]$  кг/м<sup>3</sup>;

- теплоемкость жидкой и паровой фаз бензина. Химическая энциклопедия [129] сообщает интервальную оценку теплоемкости жидкой фазы  $c_p \in [2.0, 2.1]$  кДж/кг·К. Для паровой фазы в качестве интервальных оценок для интересующего нас диапазона температур принимаем  $c_{пф} \in [2.46, 2.6]$  кДж/кг·К;

- удельная теплота испарения бензина  $\Delta H_b$ , Дж/кг. Для автомобильного бензина "регуляр" справочники приводят интервальное значение  $\Delta H_b \in [290, 300] \cdot \text{кДж/кг}$ .

Еще один внешний параметр расчетной модели – ускорение свободного падения – представлен вырожденным интервалом:  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ .

Внутренним параметром является диаметр пролива  $d_{\text{пр}}$ , м. Принимая, что пролив имеет круглую форму, его эквивалентный диаметр может быть найден по соотношению  $d_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{пр}}}{\pi}}$ , м. Принимая значения  $S_{\text{пр}}$  из таблицы 3.1, получаем величину  $d_{\text{пр}}$ , м, для рассматриваемых вариантов ГС аварии:

Таблица 3.5 – *Диаметр пролива для вариантов головного события аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов*

Вариант ГС /параметр	-2,h	-2,g	-2,e	-2,d
Диаметр пролива $d_{\text{пр}}$ , м	[16.6, 166]	[1.47, 1.95]	[4.2, 32.5]	[0.7, 1.6]

Будем считать, что диаметр (эквивалентный) пожара совпадает с диаметром пролива  $d_{\text{пр}}$ . Зависимость удельной массовой скорости выгорания  $m'$  горючего вещества от скорости ветра и диаметра пролива в [61] проигнорирована, ей присвоено точечное значение  $0.06 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ .

Для расчета геометрического фактора видности  $F_q$  необходимо значение ряда параметров: длины пламени  $L_{\text{пл}}$ , угла его наклона под действием ветра  $\theta_{\text{пл}}$  и др. Но прежде вычислим по (2.34) вспомогательный параметр безразмерной скорости ветра  $u_*$ .

Полученные интервалы  $u_*$  следует разбить на два подинтервала каждый: 1)  $u_{*1} \in [0, 1]$ ; 2)  $u_{*2} \in [1, \text{sup}(u_*)]$ . Для значений  $u_{*1}$  длина пламени  $L_{\text{пл}}$  оценивается по соотношению (2.33), а для  $u_{*2}$  – по (2.32). Здесь  $\text{sup}(s)$  обозначена верхняя граница интервального числа  $s$ .

С учетом зависимости плотности воздуха от температуры длина пламени для четырех вариантов ГС представлена двумя матрицами размера  $4 \times 26$ , строки которых могут быть объединены операцией взятия интервальной оболочки. Учитывая многократное вхождение интервальных параметров в формулы (2.36) – (2.39), для нахождения левых частей расчетных соотношений воспользуемся методом глобальной оптимизации.

Результаты расчета целевой метрики сценария "Пожар пролива" и условные вероятности для всех вариантов головного события аварии сведены в таблицу 3.6.

*Сценарий аварии "Длительное испарение пролива"*. В отсутствие "подходящего" источника зажигания после возникновения пролива бензина на подстилающую поверхность будет иметь место длительное испарение последнего с образованием облака ТВС.

Таблица 3.6 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Пожар пролива" для вариантов головного события аварии на территории резервуарного парка*

Вариант ГС /параметр	-2,h	-2,g	-2,e	-2,d
Интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup>	[12.9, 13.6]	[14.0, 14.1]	[9.1, 11.4]	[15.9, 16.3]
Условная вероятность	[0.04, 0.2]	[0.06, 0.3]	[0.04, 0.2]	[0.06, 0.3]

Целевая метрика данного сценария – интенсивность (удельная массовая скорость)  $w$ , кг/с, испарения бензина, [46].

К числу параметров природно-эксплуатационной группы относятся величина скорости ветра  $u_w$  и температура пролива (принимаемая равной температуре атмосферного воздуха  $T_a$ ).

Модельными параметрами задачи являются вырожденные интервалы:

- константы уравнения Антуана для расчета давления насыщенных паров  $P_n$  бензина. С учетом непостоянного фракционного состава бензина расчет давления его насыщенных паров могут быть выполнены с использованием корреляции Антуана. Коэффициенты Антуана для бензина можно найти в справочной литературе. Так, Пособие [74] для летнего бензина Аи-93 приводит следующие точечные оценки:  $A = 4.123$ ;  $B = 664.976$ ;  $C_A = 221.695$  (применимость этих значений указана в температурном диапазоне от  $-60$  до  $95$  °С);

- константа Кавамуры-МакКея  $C_{K\&M} = 0.004786$ ;
- число Шмидта паров бензина  $Sc_n = 0.8$ .

Параметры смешанного типа представлены величиной молярной массы бензина  $\mu$ .

Анализ модельной неопределенности данного сценария и ее количественная оценка выполнены во второй главе диссертации. Как показано нами в [41], в штилевых условиях модель Кавамуры-МакКея прогнозирует  $w = 0$ , что нефизично, поскольку в отсутствии в атмосфере турбулентности будет "работать" молекулярно-диффузионный перенос, описываемый моделью нормативной методики МЧС РФ [61]. Оценка величины  $w$  по (2.42) дает для принятого нами температурного диапазона интервал  $w \in [0.12, 0.28] \cdot 10^{-3}$  кг/с·м<sup>2</sup>. Его верхнюю границу можно принять в качестве нижней границы прогноза по модели Кавамуры-МакКея (2.47).

Учитывая факт сильной зависимости  $P_n(T_v)$ , для уменьшения вычислительной неопределенности интервального метода при расчете  $w$  по (2.47) воспользуемся методом Р.Мура, после чего по каждому варианту ГС для всего диапазона температур получим интервальную оболочку 26-ти компонентных брусков  $w$ . Итоги расчета сведем в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Длительное испарение пролива" для вариантов головного события аварии на территории резервуарного парка*

Вариант ГС /параметр	-2,h	-2,g	-2,e	-2,d
Интенсивность испарения $w$ , кг/с·м <sup>2</sup>	[0.0003, 0.038]	[0.0003, 0.049]	[0.0003, 0.035]	[0.0003, 0.053]
Условная вероятность	[0.08, 0.4]	[0.1, 0.5]	[0.08, 0.4]	[0.1, 0.5]

**Второй ярус** ДГБ аварии на территории резервуарного парка представлен, в общем случае, шестью сценариями. Однако совершенно очевидно, что спектр его возможных сценариев неодинаков для различных вариантов головного события аварии.

*Сценарий аварии "BLEVE"*. Целевые метрики – энергетический потенциал взрыва  $E_{\text{eff}}$ , Дж, и скорость разлета осколков  $u_{\text{оск}}$ , м/с. Начнем с количественной оценки параметрической неопределенности:

1) к числу параметров природно-эксплуатационной группы отнесем:

- пропускную способность  $W_0$  клапанов резервуара РГС-75: дыхательного (НКДМ-150) и предохранительного (КПП-150), составляющую (по воздуху) по данным завода-изготовителя 500 м<sup>3</sup>/ч, что эквивалентно 0.139 м<sup>3</sup>/с. С учетом технологического разброса в пределах  $\pm 5\%$  примем интервальную оценку  $W_0 \in [0.136, 0.143]$  м<sup>3</sup>/с;

- массу оболочки РГС-75  $M_{\text{рез}}$ . С учетом данных завода-изготовителя и технологического разброса в пределах  $\pm 2\%$  положим  $M_{\text{рез}} \in [7450, 7830]$  кг;

- абсолютное давление в резервуаре в момент взрыва  $P_1$ , кПа. Это давление, с одной стороны, равно давлению насыщенных паров бензина (определяемого температурой его жидкой фазы), с другой – прочностью на разрыв резервуарных стенок, ослабленных внешним нагревом. Таблица 7.1 [148] рекомендует в качестве избыточного давления  $\Delta P_1$  (абсолютное давление паров минус внешнее, атмосферное) принимать "рабочее давление" сосуда, умноженное на коэффициент запаса, "обычно равный 2.5".

Учитывая, что для РГС-75 с коническими (полусферическими) днищами прочность на избыточное внутреннее давление в холодном состоянии составляет, согласно [18], 70 кПа, принимаем экспертно избыточное давление в его паровом пространстве в момент взрыва  $\Delta P_1 \in [165, 185]$  кПа, что соответствует абсолютному давлению  $P_1 \in [266, 286]$  кПа. По соотношению

$$T_1 = \frac{B}{A - \lg P_{\text{val}}} - C_A + 273.15, \quad (3.14)$$

из методики [61] этому диапазону давления насыщенных паров может быть найден соответствующий диапазон температуры в резервуаре  $T_1 \in [443, 450]$  К. Анализ полученного

значения показывает, что при таких температурах не все фракции бензина окажутся в перегретом термодинамическом состоянии;

- массу жидкой фазы горючего вещества в момент взрыва  $m_{ж1}$ , кг. Неопределенность этого параметра очень велика, поскольку его величина зависит от множества факторов случайной природы – количества бензина, находившегося в резервуаре на начало аварии, динамики притока тепла к резервуару от внешнего пожара, продолжительности испарения жидкой фазы до момента разрушения резервуара. Намеренно выбираем очень широкий интервал  $m_{ж1} \in [200, 40000]$  кг, коррелирующий с принятым нами ранее объемом хранения бензина в РГС-75;

2) группа модельных параметров представлена следующими величинами:

- числом образующихся осколков оболочки резервуара  $N_{оск}$ . Вместимость РГС-75 не попадает в диапазон применимости модели Холдена и Ривса (Holden and Reeves), [179], (см. ниже), число обломков оболочки при разрушении горизонтальных резервуаров цилиндрической формы на основании практических рекомендаций [148] зададим интервалом  $N_{оск} \in [2, 3]$ ;

3) параметрами смешанного типа являются:

- молярная масса бензина  $\mu$  и температура его кипения  $T_b$ . С учетом полученных нами выше оценок температуры  $T_1$  в резервуаре существенно бóльшая часть фракций жидкой фазы бензина в момент разрушения оболочки окажется перегретой и будет испытывать взрывное гомогенное вскипание, меньшая ее часть будет диспергирована пассивно;

- удельные теплоемкости жидкой  $c_{рж}$  фазы и паровой фаз  $c_{впф}$  бензина при постоянном объеме. Принимая величину показателя Пуассона для пара  $\gamma = 1.33$  (см. ниже), получим величину  $c_{впф} = c_{рпф}/\gamma$ ,  $c_{впф} \in [1850, 1947]$  Дж/кг·К;

- удельная скрытая теплота испарения бензина  $\Delta H_b$ .

Внешние параметры, представленные вырожденными интервалами:

- константы уравнения Антуана;
- отношение удельных теплоемкостей пара  $\gamma$  (параметр Пуассона). Для паров бензина, как многоатомного вещества, во всем рассматриваемом диапазоне температур  $0 \div 130$  °С и давлений  $100 \div 300$  кПа используем "точечное" значение 1.33;

- температура выкипания при разгонке 50%-й фракции бензина  $T_{50}$ , К, согласно [25]  $T_{50} = 378$  К;

- коэффициент поверхностного натяжения бензина при температуре 293 К  $\phi_{293} = 0.03$  кг/с<sup>2</sup> (по авиационному бензину Б-70), [22];

- безразмерные коэффициенты  $a_{\text{оск}}$  и  $b_{\text{оск}}$ , которым присвоены значения 0.815 и 0.355, соответственно.

Внутренним параметром является масса первичного пара в момент взрыва  $m_{\text{пл}}$ , кг, которую можно оценить по закону Менделеева-Клапейрона с учетом величины объема парового пространства резервуара  $V_{\text{пл}} \in [6.8, 74.7] \text{ м}^3$ . Однако прежде следует убедиться в правомерности использования законов идеального газа. Оценим критическую температуру бензина  $T_{\text{кр}}$  по соотношению, [106]:

$$T_{\text{кр}} = 355 + 0.97 \cdot a - 0.00049 \cdot a^2, \quad (3.15)$$

где  $a = (1.8 \cdot T_{50} - 359) \rho_{15}^{15}$ ;

$\rho_{15}^{15}$  – относительная плотность бензина при температуре 15 °С;

$T_{50}$  – температура разгонки 50 % фракций бензина, К.

Приняв значения  $\rho_{15}^{15} \in [0.735, 0.765]$ ,  $T_{50} = 378 \text{ К}$ , получаем оценку  $T_{\text{кр}} \in [550, 561] \text{ К}$ . Следовательно, приближение идеального газа для паров бензина в резервуаре перед взрывом допустимо. Полученная оценка массы паров составила  $m_{\text{пл}} \in [46, 616] \text{ кг}$  (с учетом зависимости параметров состояния пара от температуры интервальный расчет проводился методом Р.Мура с разбиением диапазона  $T_1$  на 100 подинтервалов).

Теперь выполним интервальные оценки интересующих нас параметров рассматриваемого сценария на основании термодинамических соображений, изложенных в разделе 2.5.3 второй главы диссертации. При принятом числе осколков  $N \lambda_{\text{оск}} \in [0.33, 0.5]$ , тогда  $K_{\text{оск}} \in [0.74, 0.96]$ .

Скорость звука в смесях газов при температуре  $T$  хорошо описывается формулой, [126]:

$$u_{\text{зв}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \hat{R} \cdot T}{\mu}}, \quad (3.16)$$

где  $\mu$  – молярная масса вещества, кг/кмоль.

С учетом  $\gamma = 1.33$  и  $\mu \in [88.1, 149.7] \text{ кг/кмоль}$  получаем по (3.16) величину скорости звука в парах бензина при атмосферных условиях  $u_{\text{зв.пл}} \in [142, 194] \text{ м/с}$ , в паровом пространстве сосуда перед взрывом (в термодинамическом состоянии  $P_1, T_1$ )  $u_{\text{зв1}} \in [181, 238] \text{ м/с}$ . Далее рассчитываем: а) безразмерное избыточное давление паровой фазы в резервуаре в момент взрыва  $\bar{P}'_1 \in [0.029, 0.055]$ ; б) среднюю скорость разлета осколков  $u_{\text{оск}} \in [8.4, 25.3] \text{ м/с}$ . При выполнении интервального расчета  $\bar{P}'_1$  учтено, что имеет место

связанность параметров, поэтому с целью минимизации вычислительной неопределенности используем метод Р.Мура.

Теперь может быть оценена суммарная кинетическая энергия осколков  $E_{кин} \in [0.26, 2.4] \cdot 10^6$  Дж.

Для оценки конечной температуры первичного пара  $T_2$  может быть использовано преобразованное с учетом уравнения состояния идеального газа соотношение (2.53):

$$T_1 \cdot c_v \cdot m_{пл} \cdot (1 - \psi) = \frac{P_1 \cdot V_{пл1}}{\gamma - 1} \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_0}{P_1} \right)^\gamma \cdot \psi^{-\gamma} \right) + E_{кин}, \quad (3.17)$$

где  $\psi = T_2/T_1$ .

Учитывая функциональную связанность параметров  $T_1$ ,  $P_1$ ,  $m_{пл}$  и  $E_{кин}$ , выполним "точечные" расчеты  $\psi_j$  для ста средин их подинтервалов и двух граничных значений  $c_v$ . Интервальная оболочка полученных значений  $\psi \in [0.909, 0.913]$ . В качестве конечной температуры пара примем  $T_2 \in [403, 411]$  К.

Известное значение  $T_2$  позволяет нам рассчитать энергетические параметры BLEVE:

а) энергетический потенциал, равный разнице внутренней энергии первичного пара в начальном и конечном состоянии,  $E_{eff} \in [0.33, 6.8] 10^7$  Дж;

б) долю  $\theta_{оск}$  энергетического потенциала, затраченную на разбрасывание осколков оболочки резервуара (скорость осколков оценивается по модели Холдена-Риввса).

Полученная оценка равна  $\theta_{оск} \in [0.004, 0.72]$  (справочно – согласно Бауму, [148], доля энергетического потенциала взрыва, расходуемая на разбрасывание обломков оболочки резервуара при BLEVE составляет 0.04).

Далее обратимся к оценке поведения жидкой фазы флюида при взрыве. Используя полученную по (2.62) интервальную оценку  $\varphi_0 \in [0.074, 0.076]$  кг/м<sup>2</sup>, вычислим поверхностное натяжение  $\varphi(T_3)$  жидкой фазы, в результате получаем интервал  $\varphi(T_3) \in [0.0195, 0.0211]$  кг/м<sup>2</sup>.

Оценка эффекта увеличения давления насыщенного пара  $\Delta P_n$  вблизи искривленной поверхности по (2.63) для капель диаметром 100 мкм дала  $\Delta P_n \in [3.0, 4.1]$  Па, что значительно меньше давления насыщенного пара бензина над плоской поверхностью. Таким образом, величина эффекта для капель данного размера незначительна.

Уравнение (2.64) можно использовать для нахождения массы жидкой фазы  $m_{ж2}$  флюида после взрыва. Введя обозначение  $\zeta = m_{ж2}/m_{ж1}$ , после приведения подобных членов получаем линейное уравнение относительно  $\zeta$ :

$$\zeta \cdot \left[ \Delta H_b + c_v \cdot T_3 + \frac{P_0}{\rho_{\text{вп}}} + \frac{3 \cdot \varphi(T_3)}{16 \cdot d_k \cdot \rho_{\text{ж}}} - c_{\text{ж}} \cdot T_3 \right] = \Delta H_b + c_v \cdot T_3 + \frac{P_0}{\rho_{\text{вп}}} - c_{\text{ж}} \cdot T_1. \quad (3.18)$$

Процедура verifylss INTLAB с учетом зависимости плотности пара от температуры находит решение этого линейного уравнения с интервальными коэффициентами для всех поддиапазонов  $T_3$  (условных фракций бензина). Найденные интервальные значения меняются от  $\zeta \in [0.002, 0.55]$  для наиболее легколетучих фракций до  $\zeta \in [0.19, 0.91]$  для самых высококипящих. Для дальнейших количественных оценок необходимо задать фракционный состав бензина. Если условно приписать каждой фракции равный вес, можно получить следующие оценки:

а) убыль внутренней энергии жидкой фазы по (2.64),  $\Delta U_{\text{ж}} \in [0.0037, 3.8] 10^{10}$  Дж; составляющие правой части (3.18), "стоки" энергии:

б) тепло фазового перехода  $Q_{\text{исп}} \in [0.0005, 1.2] 10^{10}$  Дж;

в) работа вторичного пара  $A_{\text{вп}} \in [0.0005, 1.16] 10^9$  Дж;

г) поверхностная энергия капель  $E_{\text{пов}} \in [0.0002, 6.9] 10^4$  Дж.

Как видно, основным "стоком" энергии является теплота, расходуемая на испарение жидкой фазы флюида.

Таким образом, хотя энергетический потенциал жидкой фазы  $\Delta U_{\text{ж}}$  больше, чем потенциал первичного пара  $\Delta U_{\text{пн}}$ , энергия  $\Delta U_{\text{ж}}$  не будет участвовать в создании поражающих факторов взрыва (воздушной взрывной волны и разбрасывании осколков). В этой связи следует вывод, что энергетический потенциал взрыва следует приравнять к  $\Delta U_{\text{пн}}$ .

Таблица 3.8 – **Целевая метрика и условная вероятность сценария "BLEVE" для единственного варианта ГС аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов**

Вариант ГС /параметр	-2,е
Энергетический потенциал $E_{\text{эф}}$ , Дж	$[0.33, 6.8] \cdot 10^7$
Средняя скорость разлета осколков, м/с	[8.4, 25.3]
Условная вероятность	[0.028, 0.14]

Сценарий аварии "Огненный шар". Целевых метрик сценария две: это интенсивность падающего на объект-мишень теплового излучения и продолжительность его свечения (время жизни). Вторая метрика также важна, т.к. эффект воздействия теплового излучения на объекты поражения в некоторых случаях оценивается с позиций "дозного" подхода, т.е. с учетом интеграла от интенсивности падающего теплового потока по времени.

Параметрическую неопределенность задачи выразим в интервальной форме:

- параметры природно-эксплуатационной группы представлены температурой атмосферного воздуха  $T_a$  и его относительной влажностью  $R_h$ ;

- параметрами смешанного типа являются: молярная масса бензина  $\mu$ , его тепло-творная способность  $\Delta H_c$ , удельная теплота парообразования  $\Delta H_b$ , а также удельная изобарная теплоемкость паровой фазы  $c_{пф}$ .

Ряд внешних параметров задачи представлен вырожденными интервалами, это коэффициенты уравнения Антуана и среднеповерхностная плотность теплового излучения (светимость) ОШ  $E_{fn} = 350 \text{ кВт/м}^2$ , [61].

Внутренними параметрами модели являются:

- начальная масса флюида в огненном шаре  $M_0$ . Она равна массе бензина  $m_{ж1}$ , находящегося в резервуаре в момент взрыва и выброшенного в капельно-паровой фазе в окружающее пространство в результате BLEVE;

- давление в резервуаре в момент взрыва  $P_1$ . Количественные оценки этих параметров были выполнены в рамках предыдущего сценария.

Количественные оценки по формулам раздела 2.5.4:  $D_{ОШ} \in [36.2, 202.9] \text{ м}$ ;  $t_{ОШ} \in [3.4, 13.4] \text{ с}$ . Высоту подъема центра ОШ  $H_{ОШ}$  приравниваем к его диаметру  $H_{ОШ} = D_{ОШ}$ . Прежде выполнения расчетов преобразуем (2.70) с целью исключения повторного вхождения в него параметров

$$F_q = \frac{1}{4 \cdot \left( 1 + \left( \frac{X}{D_{ОШ}} \right)^2 \right)}. \quad (3.19)$$

Результат расчета  $F_q$ : для объекта-мишени, расположенного на удалении 100 м от проекции центра ОШ, геометрический фактор видности  $F_q \in [0.029, 0.2]$ . Коэффициент прозрачности атмосферного воздуха для теплового излучения ОШ на удалении 100 м, рассчитанный по (2.71),  $\tau(100) \in [0.92, 0.94]$ .

Окончательно, интервальная оценка интенсивности падающего на объект-мишень теплового излучения по (2.41)  $I \in [9.6, 64.5] \text{ кВт/м}^2$ .

Таблица 3.9 – **Целевые метрики и условная вероятность сценария "Огненный шар" для единственного варианта ГС аварии на территории резервуарного парка**

Вариант ГС /параметр	-2,е
Интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м <sup>2</sup>	[9.6, 64.5]
Длительность свечения ОШ, с	[3.4, 13.4]
Условная вероятность	[0.028, 0.14]

Сценарий аварии "Факельное горение". Согласно ДГБ (рисунок 3.1) одним из следствий пожара пролива бензина при ГС -2.е в случае эскалации аварии по механизму "доми-

но" может стать нагревание попавших в область пожара соседних резервуаров РГС-75 с бензином. Уже при небольшом повышении температуры внутри обогреваемого резервуара его дыхательный и предохранительный клапаны откроются. Вытекающие из них струи горячих паров вспыхнут и будут гореть в виде двух факелов. Дальнейшее развитие аварии вариативно:

а) если мощность внешнего притока тепла достаточно велика, образующаяся вследствие кипения в резервуаре паровая фаза бензина не будет успевать вытекать из него вследствие ограниченной пропускной способности обоих клапанов, вследствие чего давление в резервуаре будет нарастать вплоть до разрушения резервуара. Это сценарий BLEVE, рассмотренный нами выше;

б) при меньшем притоке тепла извне будет наблюдаться длительное факельное горение вытекающих из отверстий клапанов паровых струй (длящееся до полного выкипания бензина, или прекращения пожара).

Таким образом, факельное горение паровых струй характерно для обоих сценариев развития аварии, различие заключается лишь в его продолжительности. Обычно рассматриваются направленные вверх, или отклоненные от вертикали факелы. Однако в случае аварий высоконапорных сооружений (таких как магистральный газопровод) могут образовываться газовые струи, направленные, в том числе, квазигоризонтально. В случае их возгорания будут наблюдаться горящие факелы большой длины, при этом в области их пламени могут оказаться как люди, так и материальные ценности. Но это довольно специфические аварии, для моделирования которых разработаны специальные Руководства, например, отраслевые стандарты ОАО "Газпром": СТО Газпром 2-2.3-400-2009 [107] и др.

Целевая метрика рассматриваемого сценария аварии – интенсивность падающего на объект-мишень теплового излучения горящего факела. Параметрическую неопределенность задачи, как обычно, выразим в интервальной форме.

К числу параметров природно-эксплуатационной группы отнесем:

- температуру атмосферного воздуха  $T_a$  и его относительную влажность  $R_h$ , скорость ветра  $u_w$ ;
- диаметр аварийного отверстия  $d_j$ . В наиболее общем случае аварии с обогреваемым резервуаром этот параметр является случайной величиной. Однако в рассматриваемом нами сценарии величина  $d_j$  детерминирована и известна точно,  $d_j$  равен диаметру клапана резервуара,  $d_j = 0.15$  м;
- аналогично, в общем случае угол между осью аварийного отверстия и горизонталью в направлении ветра  $\theta_j$  может быть произвольным. Однако при реализации события 2.f он точно известен изначально,  $\theta_j = 90^\circ$ .

Параметры модельной группы:

- величина критического давления в резервуаре  $P_{\text{рез.кр}}$ , разделяющего режимы докритического и сверхкритического истечения паровой струи, может быть оценена следующим образом: согласно Руководству [173] величина критического давления при истечении реальных газов обычно принимается равной 20 psig. С учетом соотношения единиц  $1 \text{ psi (фунт/дюйм}^2) = 6.89 \text{ кПа}$  это соответствует 138 кПа. Однако следует учесть, что в Британии и США в единицах psig измеряется так называемое "приборное" (манометрическое) давление, которое соответствует отечественному понятию "избыточное" давление. Абсолютное давление там принято измерять в psia. Таким образом, абсолютное  $P_{\text{рез.кр}}$ , соответствующее 20 psig, составляет 239 кПа. Между тем оценка величины критического давления по нормативной методике [61]

$$P_{\text{рез.кр}} = P_0 \cdot \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3.20)$$

для паров бензина ( $\gamma = 1.33$ ) дает величину  $P_{\text{рез.кр}} = 187 \text{ кПа}$ . Таким образом, налицо существенное различие. Сравнивая полученные нами выше оценки критического давления  $P_{\text{рез.кр}}$  для резервуара с областью давлений внутри него  $P_{\text{рез}}$ , мы видим, что интервал  $P_{\text{рез}}$  следует разделить на два подинтервала, соответствующих режимам "незапертого" и "запертого" истечения. В качестве границы выберем  $P_{\text{рез.кр}} = 187 \text{ кПа}$  – значение, полученное по (3.20).

Группа параметров смешанного типа представлена молярной массой бензина  $\mu$ , скрытой удельной теплотой его испарения  $\Delta H_b$  и его теплотворной способностью  $\Delta H_c$ .

Ряд параметров задачи задан скалярными числами, таковы коэффициенты уравнения Антуана, параметр Пуассона паров бензина  $\gamma$ , эмпирический коэффициент  $K_\phi = 15$ .

Внутренними параметрами задачи являются:

- внутреннее давление в резервуаре  $P_{\text{рез}}$ . Этот параметр очень важен, поскольку он: 1) определяет массовую скорость истечения флюида из отверстия; 2) позволяет рассчитать температуру в паровом пространстве резервуара по уравнению Антуана. Принимая во внимание, что динамику притока тепла к резервуару от внешнего пожара с учетом большого числа обстоятельств недерминированной природы прогнозировать невозможно, укажем, что диапазон давления  $P_{\text{рез}}$  снизу ограничен атмосферным давлением  $P_0$ , а сверху – прочностью горячих резервуарных стенок к разрыву внутренним давлением  $P_1$  (равным давлению внутри резервуара в момент разрушения последнего),  $P_{\text{рез}} \in [P_0, P_1] = [101.3, 286] \text{ кПа}$ ;

- температура паровой фазы флюида в резервуаре  $T_{рез}$ . По уравнению Антуана  $T_{рез} \in [365.5, 450.4]$  К. Анализ геометрических параметров резервуара РС-75 показывает, что выходные отверстия его дыхательного и предохранительного клапанов расположены на различной высоте, но довольно близко друг к другу по горизонтали. Будем считать в дальнейшем, что высота расположения этих отверстий  $z$  одинакова и равна 3.6 м. В анализируемых нами Руководствах по КОР вопрос о геометрических параметрах факела, формируемого струями из близкорасположенных отверстий, не рассмотрен. Учитывая, что расстояние между центрами отверстий клапанов много меньше диаметра факела, будем считать впредь, что формируется один факел с удвоенным массовым расходом горючего вещества.

Для расчета геометрических параметров пламени (его длины и диаметра) необходима величина массового расхода пара  $q$ , кг/с, через отверстие. Последняя, в свою очередь, в зависимости от типа истечения может быть рассчитана либо по (2.8), либо по (2.9). С целью определения коэффициента истечения  $\sigma$  клапана предположим, что из резервуара вытекает воздух, находящийся в нем в термодинамическом состоянии с параметрами ( $P_{усл} = 104$  кПа,  $T_{усл} = 288$  К). Сравнивая полученное по (2.8) значение  $W_0 = 1.14$  м<sup>3</sup>/с с паспортной производительностью клапана  $W_{0,пасп} = 0.139$  м<sup>3</sup>/с, получаем оценку  $\sigma = 0.122$ .

Учитывая связность параметров уравнений (2.8) и (2.9), рассчитаем с использованием метода Р.Мура величину массового расхода паров бензина через клапан в докритическом и сверхкритическом режимах истечения:

а) докритический режим  $G_{выб} \in [0, 2.23]$  кг/с;

б) сверхкритический режим  $G_{выб} \in [2.3, 3.56]$  кг/с.

Чтобы получить полную оценку величины  $G_{выб}$  для всего диапазона давления паров внутри резервуара  $P_{рез}$ , удвоим массовый расход пара через клапан и объединим интервалы, в результате получим  $G_{выб2} \in [0, 7.12]$  кг/с (небольшим зазором, обязанным несовершенству методики, пренебрежем). Нулевая нижняя граница интервала обусловлена тем, что нормативная методика не дает указаний об ограничении области применимости модели снизу.

Воспользовавшись теперь (2.72) и (2.73), получим интервальные оценки геометрических параметров факела:  $L_{ф} \in [0, 32.9]$  м,  $d_{ф} \in [0, 4.9]$  м. Светимость пламени  $E_f$  принимаем по таблице ПЗ.4 [61] по бензину для диаметров менее 10 м,  $E_f = 60$  кВт/м<sup>2</sup>.

На следующем шаге для расчета интенсивности падающего на объект-мишень теплового потока  $I$  необходимо задать геометрический фактор видности  $F_q$  и прозрачность атмосферы  $\tau$ . Пламя представлено в нашем рассмотрении вертикальным цилиндром,

приподнятым над поверхностью земли на высоту  $z = 3.6$  м. Принимая во внимание, что нормативная методика [61] игнорирует эффект "приподнятого пламени" при расчете геометрического фактора  $F_q$ , получаем оценки его величины по формулам (2.36) – (2.39) с учетом  $\theta = 0^\circ$  для  $X = 100$  м, результат расчета  $F_q \in [0, 0.27]$ .

Коэффициент ослабления теплового потока горящего факела в атмосферном воздухе  $\tau(100)$ , рассчитанный по (2.40), составляет  $\tau \in [0.932, 0.934]$ .

Таким образом, нормативная методика прогнозирует величину интенсивности падающего на объект-мишень потока теплового излучения  $I$ , равную  $I \in [0, 14.9]$  кВт/м<sup>2</sup>.

Таблица 3.10 – **Целевая метрика и условная вероятность сценария "Факельное горение паров" для единственного варианта ГС аварии на территории резервуарного парка**

Вариант ГС /параметр	-2,е
Интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup>	[0, 14.9]
Условная вероятность	[0.0012, 0.06]

*Сценарий аварии "Объемный взрыв ТВС"*. При длительном испарении пролива в отсутствие источника зажигания в атмосферном воздухе формируется облако топливовоздушной смеси. Концентрация паров бензина в пределах этого облака неоднородна – она максимальна в центре облака ТВС и минимальна по его краям. Согласно принятым штилевым условиям облако ТВС не будет дрейфовать, оставаясь неподвижным.

В случае появления в области, занятой облаком ТВС, источника зажигания с достаточной энергией, произойдет быстрое сгорание облака. Согласно результатам многочисленных наблюдений в одних случаях сгорание сопровождается образованием воздушных взрывных волн (т.е. распространяющихся во все стороны волн избыточного давления), в других – ТВС сгорает без образования таких волн, в режиме так называемого "пожара-вспышки". Какой именно сценарий будет реализован, априори неясно.

Целевых метрик сценария "Объемный взрыв" две: амплитуда избыточного давления  $\Delta P$ , Па, и импульс положительной фазы давления  $I$ , Па·с.

Начиная, как обычно, с параметрической неопределенности, выразим в интервальной форме все входные параметры используемых моделей.

В природно-эксплуатационной группе два параметра: температура атмосферного воздуха  $T_a$  и скорость ветра  $u_w$ , м/с. С учетом особенностей рассматриваемого сценария в рамках нормативной методики [61] (штилевые условия, соответствующие нулю баллов по шкале Бофорта, используемой Всемирной метеорологической организацией) отдельно выделяем диапазон  $u_{w1} \in [0, 0.25]$  м/с.

Группа модельных параметров задачи представлена:

- продолжительностью испарения пролива  $t_{\text{исп}}$ , с, равной временному лагу между началом формирования ТВС и моментом появления источника зажигания. Учитывая данные Ленойра и Давенпорта (Lenoir & Davenport) [196] и положение п.6 Приложения 3 нормативной методики МЧС РФ [61], принимаем, что расчетная продолжительность испарения пролива, отсчитываемого от его начала до взрыва облака ТВС  $t_{\text{исп}} \in [6, 3600]$  с;
- величиной стехиометрической концентрации бензина в смеси с воздухом  $C_{\text{стх}}$ , об. %. Согласно [83] стехиометрическая концентрация вещества при его сгорании в воздухе может быть найдена по соотношению

$$C_{\text{стх}} = \frac{100}{1 + 4.84 \cdot \beta_{\text{стх}}}, \quad (3.21)$$

где  $\beta_{\text{стх}} = m_C + m_S + m_{Si} + 2.5m_P + 0.25(m_H + m_X) - 0.5m_O$ ;  $m_C, m_S, m_{Si}, m_P, m_H, m_X, m_O$  – число атомов углерода, серы, кремния, фосфора, водорода, галогенов и кислорода в молекуле горючего. Оценку  $\beta_{\text{стх}}$  можно получить по суммарной формуле летнего автомобильного бензина Аи-92. Пособие [75] сообщает точечную оценку  $C_{7.0H13.71}$ , тогда  $\beta_{\text{стх}} = 10.42$ . Если аналогично принятому нами ранее диапазону относительной вариации молярной массы бензина  $\Delta\mu / \bar{\mu} \approx 0.5$ , принять  $\Delta\beta_{\text{стх}} / \bar{\beta}_{\text{стх}} \approx 0.5$ , то для коэффициента  $\beta_{\text{стх}}$  получим интервальную оценку  $\beta_{\text{стх}} \in [7.8, 13.0]$ . С учетом этих оценок интервал стехиометрической концентрации:  $C_{\text{стх}} \in [1.56, 2.58]$  об. %;

- значением  $C_{\text{НКПР}}$  паров бензина, об. %. Справочник [73] приводит значение  $C_{\text{НКПР}} = 0.96$  об. %, Пособие [75] – 1.06 об. %. Таким образом, в качестве  $C_{\text{НКПР}}$  можно принять интервал  $C_{\text{НКПР}} \in [0.96, 1.06]$  об. %;

- реактивность вещества, участвующего в аварии (бензина Аи-92), по классификации нормативной методики позволяет отнести его к третьему классу. Класс окружающего пространства, являющегося резервуарным парком – также третий. Следовательно, согласно экспертной таблице ПЗ.2 [61] наиболее вероятен четвертый режим со скоростью фронта пламени  $u_{\text{фр4}} \in [150, 200]$  м/с.

Параметрами смешанного типа являются: молярная масса бензина  $\mu$ , кг/кмоль, и удельная теплота его сгорания  $\Delta H_c$ , кДж/кг.

Вырожденными интервалами задаются следующие внешние параметры:

- атмосферное давление, Па. В области пожарной безопасности принято пренебрегать вариациями атмосферного давления, поэтому представим его в виде вырожденного интервала  $P_0 = 101325$  Па;

- коэффициент участия паров во взрыве (по методике МЧС РФ [61]  $Z = 0.1$ );
- коэффициенты уравнения Антуана для давления насыщенного пара бензина;
- универсальная газовая постоянная  $\hat{R} = 8314$  Дж/кмоль·К;
- молярный объем  $V_{\mu} = 22.4$  м<sup>3</sup>/кмоль;
- молярная масса воздуха  $\mu_{\text{в}} = 29$  кг/кмоль;
- стандартная температура  $T_{\text{ст}} = 288.15$  К;
- стандартная плотность воздуха,  $\rho_{\text{ст.в}} = 1.225$  кг/м<sup>3</sup>;
- показатель адиабаты воздуха,  $\gamma = 1.4$ ;
- ускорение свободного падения  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup>.

Внутренние параметры модели представлены:

- эффективным диаметром пролива  $d_{\text{пр}}$ , м;
- величиной скорости  $u_{\text{зв}}$  звука в воздухе, м/с;
- величиной интенсивности (массовой удельной скорости) испарения  $w$ , кг/м<sup>2</sup>·с, являющейся целевой метрикой сценария 1.e (ее значения для всех четырех вариантов головного события приведены в таблице 3.7).

Сначала выполним оценки параметров взрыва для дефлаграционного режима сгорания ТВС для всех четырех вариантов ГС, начав с оценки массы горючего вещества в нем  $m_{\text{п}}$ , кг. Она может быть найдена по известным значениям трех параметров: а) площади пролива  $S_{\text{пр}}$ ; б) интенсивности испарения  $w$ ; в) продолжительности испарения  $t_{\text{исп}}$ . Далее, масса горючего вещества  $m_2$ , находящегося в той части ПВО, где концентрация его паров находится в диапазоне между НКПР и ВКПР, кг, согласно [61] составляет  $Z m_{\text{п}}$ .

Величина средней концентрации паров бензина в облаке ТВС  $C_{\text{п}}$ , об. %, может быть найдена как частное от деления массы паров в облаке на его объем. Учитывая выражения для радиуса (2.87) и высоты облака, аппроксимировано цилиндром, получаем

$$C_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot C_{\text{НКПР}}}{\pi \cdot 7.8^2 \cdot 0.26} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot C_{\text{НКПР}}}{49.7}. \quad (3.22)$$

С учетом зависимости плотности паров от температуры параметр  $C_{\text{п}}$  является 26-ти компонентным брусом, с интервальной оболочкой  $C_{\text{п}} \in [0.069, 0.14]$  кг/м<sup>3</sup>. В свою очередь, интервальная оболочка бруса массовых концентраций паров, соответствующих стехиометрической  $C'_{\text{стх}} = \rho_{\text{в}} \cdot C_{\text{стх}}/100$ , равна  $[0.056, 0.17]$  кг/м<sup>3</sup>. При этом во всех 26-ти поддиапазонах температуры  $C_{\text{п}} > C'_{\text{стх}}$ , что дает основание для оценки энергетического потенциала  $E_{\text{eff}}$ , Дж, воспользоваться вторым соотношением (2.75). После нахождения

величин  $E_{\text{eff}}$  для всех вариантов ГС аварии рассчитаем безразмерное расстояние Сакса  $\bar{R}$  для условного объекта-мишени, удаленного на расстояние 100 м от центра пролива.

Прежде выполнения дальнейших интервальных расчетов с целью уменьшения вычислительной неопределенности выполним простое преобразование (2.77) и (2.79):

$$\bar{P} = \left( \frac{u_{\text{фр}}}{u_{\text{зв}}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \frac{1}{\bar{R}} \left( 0.83 - \frac{0.14}{\bar{R}} \right), \quad (3.23)$$

и

$$\bar{I} = W \cdot (1 - 0.4 \cdot W) \cdot \frac{0.0025}{\bar{R}} \left( 28 - \left( \frac{1}{\bar{R}} - 2 \right)^2 \right) \quad (3.24)$$

Теперь оценим целевые метрики рассматриваемого сценария аварии с учетом величины скорости звука в воздухе, оцененной нами выше, полученные результаты отразим в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – **Целевые метрики и условная вероятность сценария "Объемный взрыв ТВС" для вариантов головного события аварии на территории резервуарного парка**

Вариант ГС /параметр	-2,h	-2,g	-2,e	-2,d
Размерное избыточное давление $\Delta P$ , кПа	[0.0091, 1.26]	[0.0018, 0.33]	[0.0036, 2.1]	[0.0011, 0.3]
Размерный избыточный импульс $I$ , Па·с	[ $2.4 \cdot 10^{-4}$ , 1.9]	[ $9.7 \cdot 10^6$ , 0.13]	[ $3.9 \cdot 10^{-5}$ , 5.1]	[ $3.6 \cdot 10^{-6}$ , 0.11]
Условная вероятность	[0.04, 0.2]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]

Выполнить оценки параметров объемного взрыва облака ТВС при детонационном режиме его сгорания по расчетным соотношениям (2.83) и (2.84) не представляется возможным, поскольку интервал безразмерного расстояния Сакса  $\bar{R}$  в рассматриваемой задаче ( $0.2 < \bar{R} < 6.5$ ) находится вне области применимости модели [90].

*Сценарий аварии "Пожар-вспышка"*. Целевая метрика данного сценария аварии очевидна – это размер зоны воздействия пламени при сгорании облака ТВС. Внешние параметры имеются только у модели [61], поскольку, согласно подходу других Руководств по КОР, пространственные характеристики облака рассчитываются по дисперсионным моделям. Перечислим внешние параметры задачи.

Параметром природно-эксплуатационного типа в данном сценарии является температура атмосферного воздуха  $T_a$ .

Модельный параметр задачи тоже один, это величина НКПР бензина  $C_{\text{НКПР}}$ .

К числу параметров смешанного типа относится температура кипения бензина  $t_b$ , °C, интервал которой по уравнению Б.П.Воинова позволяет задать интервал его молярной массы  $\mu$ .

Внешние параметры задачи, заданные вырожденными интервалами:

- коэффициенты уравнения Антуана;
- универсальная газовая постоянная  $\hat{R}$ ;
- молярный объем  $V_\mu$ ;
- атмосферное давление  $P_0$ .

Внутренними параметрами задачи являются удельная массовая скорость испарения пролива бензина  $w$ , кг/с·м<sup>2</sup>, площадь пролива  $S_{пр}$ , м<sup>2</sup>, при разных вариантах головного события аварии и продолжительность испарения  $t_{исп}$ , с.

Согласно методике [61] облако ТВС являет собой цилиндр, у которого высота относится к радиусу как 1:30 (см. раздел 2.5.7 второй главы диссертации). С учетом термодинамической связанности параметров  $m_n$  и  $\rho_n$  интервальные вычисления по соотношению (2.87) выполнены комбинацией методов Р.Мура и глобальной оптимизации.

Полученные интервальные оценки  $R_F$  сведем в таблицу 3.12.

Таблица 3.12 – **Целевая метрика и условная вероятность сценария "Пожар-вспышка" для вариантов головного события аварии на территории резервуарного парка**

Вариант ГС /параметр	-2,d	-2,e	-2,g	-2,h
Радиус воздействия $R_F$ , м	[0.24, 5.1]	[0.84, 35.3]	[0.4, 5.6]	[2.2, 21.4]
Условная вероятность	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.04, 0.2]

*Сценарий аварии "Дрейф облака по ветру"*. Данный сценарий заключается в переносе ветровым потоком облака ТВС, образующегося при длительном испарении пролива бензина в отсутствии "подходящего" ИЗ. Целевыми метриками сценария являются размеры облака: ширина и высота.

Параметры природно-эксплуатационной группы представлены температурой атмосферного воздуха  $T_a$  и скоростью ветра  $u_w$ . Всемирная метеорологическая организация (ВМО) считает штормом ситуацию, при которой скорость ветра на высоте 10 м не превышает 0.25 м/с. Будем считать, что дрейф облака ТВС в атмосфере возможен, когда скорость ветра выше данного порога, т.е.  $u_w \in [0.25, 9.0]$  м/с.

Модельными параметрами задачи являются величина НКПР бензина  $C_{НКПР}$ .

Параметр смешанного типа один, это молярная масса бензина  $\mu$ , кг/кмоль.

Внутренними параметрами модели являются площадь (диаметр) пролива и удельная массовая скорость испарения  $w$ ,  $\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$ , для различных вариантов ГС аварии и продолжительность испарения пролива  $t_{\text{исп}}$ .

Как обычно, ряд параметров задачи задан вырожденными интервалами:

- коэффициенты уравнения Антуана для давления насыщенного пара бензина;
- универсальная газовая постоянная  $\hat{R}$ ;
- молярный объем  $V_{\mu}$ ;
- атмосферное давление  $P_0$ ;
- молярная масса воздуха  $\mu_{\text{в}}$ ;
- стандартная температура  $T_{\text{ст}}$ , К;
- стандартная плотность воздуха,  $\rho_{\text{ст.в}}$ ;
- ускорение свободного падения  $g$ .

Перейдем к выполнению количественных оценок. Начальная плотность паров бензина  $\rho_{\text{п}}$  уже была оценена нами выше. Плотность паровоздушной смеси внутри ТВС можно найти с учетом величины парциальных давлений паров и воздуха:

$$\rho_{\text{ПВС}} = \frac{\mu_{\text{п}} \cdot P_{\text{н}} + \mu_{\text{в}} \cdot (P_0 - P_{\text{н}})}{\hat{R} \cdot T_{\text{в}}}, \quad (3.25)$$

где  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенных паров бензина, Па, рассчитанное по уравнению Антуана при заданной температуре  $T_{\text{в}}$ . В целях минимизации вычислительной неопределенности ввиду двукратного вхождения в (3.25) параметра  $P_{\text{н}}$ , а также его зависимости от температуры, интервальный расчет будет выполнен методом Р.Мура. Плотность паровоздушной смеси  $\rho_{\text{ПВС}}$  является 26-ти компонентным брусом.

Далее при известных значениях  $u_{\text{в}}$  и  $t_{\text{выб}} = t_{\text{исп}}$  оценим по (2.93) безразмерный параметр  $\beta_{\text{ВМ}}$ , в результате получаем  $\beta_{\text{ВМ}} \in [0.015, 324]$ . С учетом требований модели разобьем полученный интервал на три подинтервала: 1)  $\beta_{\text{ВМ1}} \in [0.015, 0.6]$ , соответствующий модели мгновенного источника; 2)  $\beta_{\text{ВМ2}} \in [0.6, 2.5]$ , переходный; 3)  $\beta_{\text{ВМ3}} \in [2.5, 324]$ , соответствующий длительному выбросу.

Для заданного расстояния  $X$  по величине  $\beta_{\text{ВМ}}$  можно найти максимальную продолжительность испарения:

$$\beta_{\text{ВМ1}} \in [0.015, 0.6] \rightarrow t_{\text{исп}} \in [17, 240] \text{ с} \Rightarrow t_{\text{исп1}} \in [17, 240] \text{ с};$$

$$\beta_{\text{ВМ2}} \in [0.6, 2.5] \rightarrow t_{\text{исп}} \in [6.6, 1000] \text{ с} \Rightarrow t_{\text{исп2}} \in [240, 1000] \text{ с};$$

$$\beta_{\text{ВМ3}} \in [2.5, 324] \rightarrow t_{\text{исп}} \in [20, 3600] \text{ с} \Rightarrow t_{\text{исп3}} \in [1000, 3600] \text{ с}.$$

Далее по (2.88) – (2.90) оценим вспомогательные параметры  $g_0$ ,  $L_j$  и  $D_{\text{с}}$ .

Полученная по (2.88) интервальная оценка  $g_0$  является брусом размерности 26 с интервальной оболочкой  $g_0 \in [19.8, 40.9] \text{ м/с}^2$ .

Объемная скорость выхода ПВС  $W_0$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , со всего зеркала пролива площадью  $S$ ,  $\text{м}^2$ :

$$W_0 = \frac{w \cdot S}{\rho_{\text{п}}}, \quad (3.26)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  – плотность паров бензина при атмосферном давлении (или температуре кипения, что эквивалентно);

$w$  – удельная массовая скорость испарения, рассчитанная по модели Кавамуры-МакКея,  $\text{кг/с} \cdot \text{м}^2$ .

Преобразовав соотношение (2.47) к виду  $w = k_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{п}}$  и устранив неоднозначность вхождения параметра  $d_{\text{пр}}$  (в модели Бриттера-МакКвайда  $d_{\text{пр}} = 2 \cdot b_0$ ), получаем:

$$W_0 = \frac{C_{\text{К\&М}}}{2^{0.11}} \cdot u_w^{0.78} \cdot Sc_{\text{п}}^{-0.67} \cdot \pi \cdot b_0^{1.89}. \quad (3.27)$$

Расчет дал для всех четырех вариантов ГС брус  $W_0 \in [0.3, 4.9] \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $[0.003, 0.086] \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $[0.022, 17.5] \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $[0.0007, 0.061] \text{ м}^3/\text{с}$ .

Параметр  $L_j$  вместо (2.89) рассчитаем по соотношению

$$L_j = \sqrt{\frac{C_{\text{К\&М}}}{2^{0.11}} \cdot u_w^{-0.22} \cdot Sc_{\text{п}}^{-0.67} \cdot \pi \cdot b_0^{1.89}}. \quad (3.28)$$

Результат – брус  $L_j \in [0.74, 1.1] \text{ м}$ ;  $[0.075, 0.15] \text{ м}$ ;  $[0.2, 2.1] \text{ м}$ ;  $[0.037, 0.12] \text{ м}$ .

Объем начального облака  $V_0$ ,  $\text{м}^3$ , при мгновенном выбросе получим произведением  $W_0 \cdot t_{\text{исп1}}$ . Тогда:  $D_{c1} \in [1.7, 10.5] \text{ м}$ ;  $[0.37, 2.7] \text{ м}$ ;  $[0.72, 16.1] \text{ м}$ ;  $[0.23, 2.5] \text{ м}$ .

То же для промежуточного случая,  $W_0 \cdot t_{\text{исп2}}$ :  $D_{c2} \in [4.16, 17.0] \text{ м}$ ;  $[0.9, 4.4] \text{ м}$ ;  $[1.7, 26.0] \text{ м}$ ;  $[0.57, 3.9] \text{ м}$ .

Введя параметр  $\text{arg1} = \sqrt{\frac{g_0 \cdot D_c}{u_w^2}}$ , оценим область применимости модели Бриттера-

МакКвайда для мгновенного выброса, указанную как  $0.7 < \text{arg1} < 10$ . Проверим выполнение данного неравенства для четырех вариантов ГС  $\text{arg1} \in [0.64, 20.9]$ ;  $[0.3, 10.6]$ ;  $[0.42, 25.8]$ ;  $[0.23, 10.0]$ .

Полученный результат свидетельствует, что область применимости модели ограничивает (при заданных размерах пролива) диапазон скоростей ветра снизу величиной  $1.5 \text{ м/с}$ , а сверху – особенно сильно для малых проливов (ГС -2,g и -2,d).

$$\text{Далее, введя обозначение } \arg 2 = \frac{(g_0^2 \cdot W_0)^{1/5}}{u_w} = g_0^{2/5} \cdot \left( \frac{C_{\text{К\&М}}}{2^{0.11}} \cdot u_w^{-4.22} \cdot Sc_{\text{п}}^{-0.67} \cdot \pi \cdot b_0^{1.89} \right)^{1/5},$$

оценим область применимости модели Бриттера-МакКвайда для продолжительного источника, указанную в безразмерном виде как  $0 < \arg 2 < 4$ .

Результат расчета  $\arg 2 \in [0.5, 13.8]; [0.2, 6.1]; [0.29, 17.8]; [0.15, 5.7]$  говорит о том, что большие ограничения допустимого диапазона скоростей ветра снизу касаются крупных проливов (ГС -2, h и -2, e).

Далее проверим выполнение еще одного ограничения модели – на величину безразмерной плотности ТВС. Поскольку номограммы, приведенные в модели Бриттера-МакКвайда для случая продолжительного выброса, применимы только при выполнении условия, что безразмерная плотность ТВС в облаке  $\bar{\rho}_{\text{ТВС}}$  превышает пороговое значение 0.15, следует убедиться в выполнении данного условия. Предварительно исключим неоднократное вхождение любых параметров в расчетное соотношение (2-92-2):

$$\bar{\rho}_{\text{ТВС}} = g_0^{1/3} \cdot \left( \frac{C_{\text{К\&М}}}{2^{0.11}} \cdot Sc_{\text{п}}^{-0.67} \cdot \pi \cdot b_0^{1.89} \right)^{1/6} \cdot u_w^{-0.73}. \quad (3.29)$$

Результат расчета  $\bar{\rho}_{\text{ТВС}} \in [0.53, 9.3]; [0.25, 4.7]; [0.34, 11.5]; [0.2, 4.5]$  говорит о том, что модель Бриттера-МакКвайда для случая продолжительного выброса ( $t_{\text{исп3}}$ ) тяжелого газа может быть использована во всем диапазоне своих параметров.

Выполним аналогичную проверку применимости модели для мгновенного выброса ( $t_{\text{исп1}}$ ) по (2-91-1)  $\bar{\rho}_{\text{ТВС}} \in [1.0, 52.2]; [0.48, 26.6]; [0.67, 64.5]; [0.38, 25.1]$ . Очевидно, условие  $\bar{\rho}_{\text{ТВС}} > 0.2$  также выполнено. И наконец, проверим применимость модели мгновенного выброса для промежуточного случая ( $t_{\text{исп2}}$ ):

$$\bar{\rho}_{\text{ТВС}} \in [1.6, 13.9]; [0.74, 7.1]; [1.0, 17.2]; [0.59, 6.7], \text{ вывод тот же.}$$

Модель предполагает адвекцию облака со скоростью  $0.4 \cdot u_w$  и, одновременно, диффузионное его расплывание в горизонтальном и вертикальном направлении. Размер облака по горизонтали от условного центра (движущегося в поле среднего ветра) задается (2.94), по вертикали – (2.95). Отметим, что для осмысленного использования номограмм необходимо сугубо сужать интервалы аргументов  $\arg 1$  и  $c_m/c_0$ , поскольку в полной интервальной постановке графический метод решения непригоден.

Для случая продолжительного выброса оценим изменение размеров факела в горизонтальном и вертикальном направлениях. Прежде чем вычислять значение вспомогательного параметра  $L_b$ , имеющего размерность длины, по (2.97), упростим его:

$$L_b = \frac{C_{\text{К\&М}}}{2^{0.11}} \cdot u_{\text{wl}}^{-2.22} \cdot Sc_{\text{п}}^{-0.67} \cdot \pi \cdot b_0^{1.89} \cdot g_0, \text{ результат расчета с учетом области допустимо-}$$

го диапазона скоростей ветра:  $L_b \in [0.13, 14.6] \text{ м}; [0.0013, 0.25] \text{ м}; [0.01, 52.3] \text{ м}; [0.0003, 0.18] \text{ м}.$

Модель Бриттера-МакКвайда для заданного расстояния от центра пролива позволяет получить:

- а) оценку полуширины факела в поперечном направлении  $b(X)$  по (2.96);
- б) размер факела в вертикальном направлении  $b_z(X)$  по (2.98).

Покажем на графиках рисунков 3.5 и 3.6, как модель Бриттера-МакКвайда прогнозирует изменение габаритов факела с расстоянием для двух вариантов ГС. Анализ полученных зависимостей показывает, что прогнозируемый данной моделью вертикальный размер факела, по-видимому, является сильно заниженным.

К сожалению, как уже было сказано, прогнозировать поражающие факторы сценарии аварии, связанные с объемным взрывом облака ТВС (событие 3.с) или его сгоранием в режиме "пожара-вспышки" (событие 3.б) с помощью модели Бриттера-МакКайда не удастся, т.к. она не позволяет оценить массу паров бензина, содержащихся в облаке во взрывоопасной концентрации.

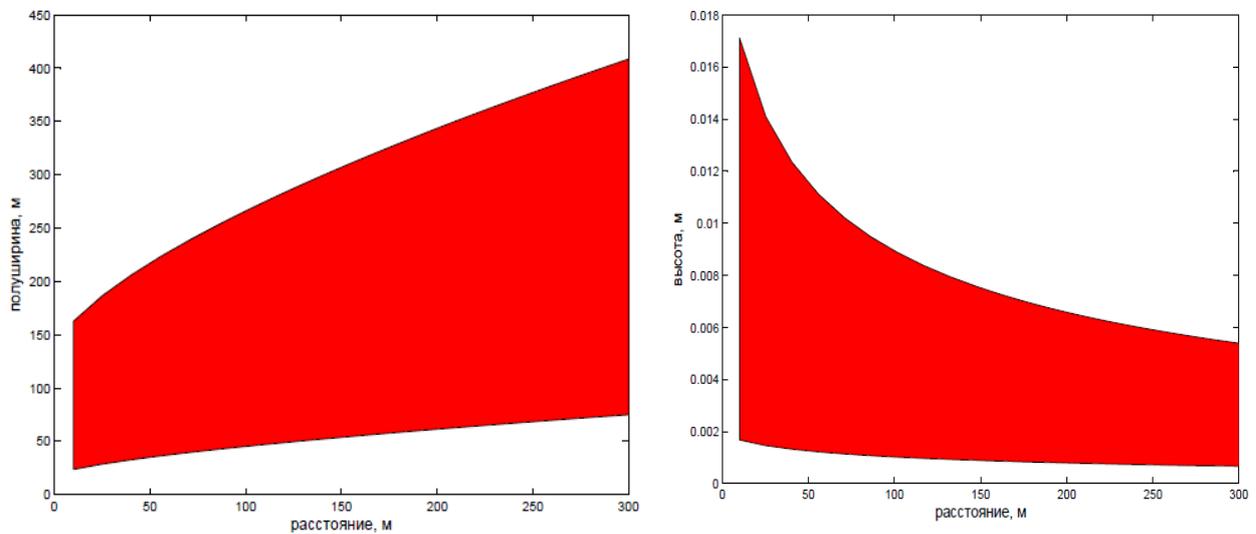


Рисунок 3.5 – Зависимость полуширины факела (слева) и его высоты (справа) от расстояния до источника (центра пролива) для варианта  $-2, h$  ГС ( $b_0 = 8.3 \text{ м}$ , скорость ветра  $u_w \in [1.5, 9] \text{ м/с}$ )

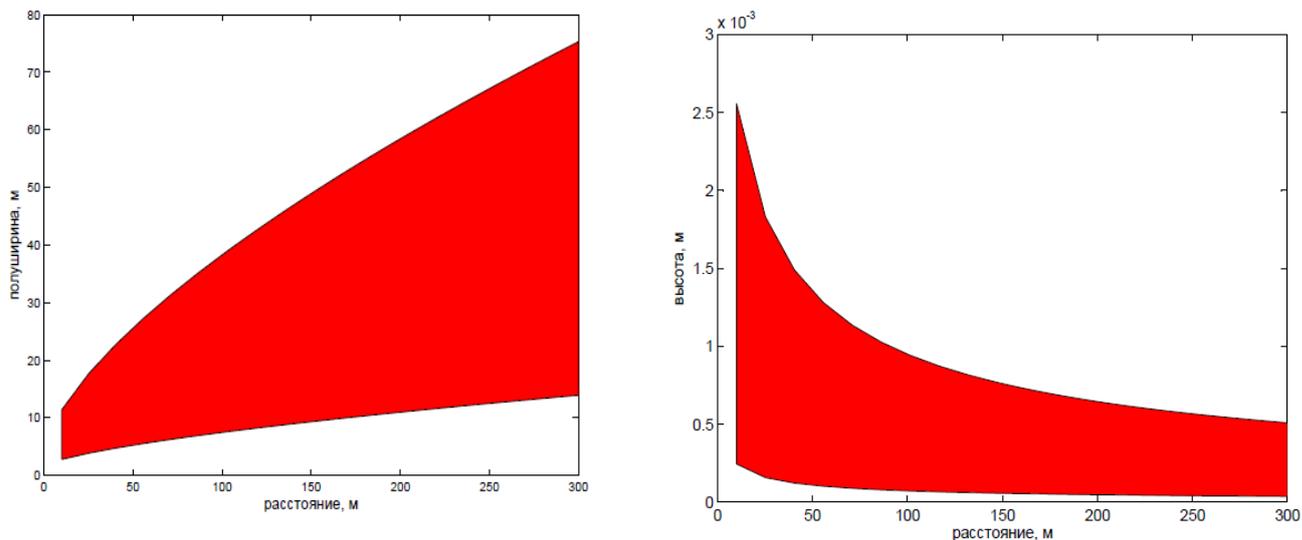


Рисунок 3.6 – Зависимость полуширины факела (слева) и его высоты (справа) от расстояния до источника (центра пролива) для варианта -2,г ГС ( $b_0 \in [0.73, 0.97]$  м, скорость ветра  $u_w \in [1.5, 9]$  м/с)

### 3.3.2 Оценка целевых метрик сценариев аварии в здании насосной светлых нефтепродуктов

Как показано на ДГБ рисунка 3.2, возможны три сценария развития аварии, сопровождающиеся поражающими факторами:

- факельное горение;
- пожар разлития;
- объемный взрыв в помещении.

Учитывая, что помещение насосного зала необитаемо, из трех перечисленных сценариев ограничимся оценкой последствий последнего. Целевой метрикой данного сценария является прогнозируемое избыточное давление  $\Delta P$ , кПа, развиваемое при взрыве в помещении. Четыре варианта головного события аварии в насосной (-2,е, -2,д, -2,с, -2,б) различаются площадью пролива, (см. таблицу 3.5).

Внешние параметры задачи:

1) природно-эксплуатационного типа – один, это температура воздуха в отапливаемом насосном зале  $T_{\text{пом}} \in [291, 294]$  К;

2) модельного типа – стехиометрическая концентрация паров бензина  $C_{\text{стх}}$ , остальные заданы вырожденными интервалами:

- коэффициент участия паров бензина во взрыве  $Z = 0.3$ , [23];
- максимальное давление, развиваемое при сгорании стехиометрической паровоздушной смеси в замкнутом объеме  $P_{\text{max}} = 900$  Па, [23];
- начальное давление,  $P_0 = 101$  кПа;

- коэффициент негерметичности помещения  $K_H = 3$ , [23];
- молярный объем  $V_\mu$ , 22.4 м<sup>3</sup>/кмоль.

Еще один внешний параметр, являющийся вырожденным интервалом – это свободный объем помещения  $V_{св} = 131$  м<sup>3</sup>.

Внутренним параметром является интенсивность (удельная массовая скорость) испарения бензина с поверхности пролива в помещении  $w$ , кг/с·м<sup>2</sup>.

Избыточное давление, развиваемое при внутреннем взрыве паров ЛВЖ в помещении, может быть оценено по формуле (А.1) [104]

$$\Delta P = \frac{100 \cdot (P_{\max} - P_0) \cdot m_{п} \cdot Z}{V_{св} \cdot \rho_{п} \cdot C_{стх} \cdot K_H}, \quad (3.30)$$

где  $\rho_{п}$  – плотность паров бензина, кг/м<sup>3</sup>, при расчетной температуре  $t_{пом}$ , °С, вычисляемая по формуле (3.13).

Однако прежде чем оценить массу паров бензина в воздухе помещения, оценим продолжительность испарения пятна пролива. Массовую интенсивность испарения рассчитываем по (2.42) с учетом отсутствия подвижности воздуха. Результат расчета  $t_{исп}$  для четырех перечисленных вариантов ГС:  $t_{исп} \in [7850, 13230]$  с;  $[60, 15036]$  с;  $[342, 26230]$  с;  $[60, 15036]$  с, следует откорректировать с учетом требования [104]  $t_{исп} \leq 3600$  с,  $\Rightarrow t_{исп} \in [0, 3600]$  с;  $[60, 3600]$  с;  $[342, 3600]$  с;  $[60, 3600]$  с. В итоге, масса паров  $m_{п}$  для всех четырех вариантов ГС:  $m_{п} \in [0, 1.0]$  кг;  $[0.01, 1]$  кг;  $[0.07, 1]$  кг;  $[0.01, 1]$  кг. Результат расчета целевой метрики данного сценария аварии – таблица 3.13.

Таблица 3.13 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Объемный взрыв паров" для вариантов головного события аварии в помещении насосной*

Вариант ГС /параметр	-2,e	-2,d	-2,c	-2,b
Избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа	[0, 10.9]	[0.046, 10.9]	[0.26, 10.9]	[0.046, 10.9]
Условная вероятность	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]

### 3.3.3 Оценка целевых метрик аварии на территории ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов"

Правая часть ДГБ рисунка 3.3 в качественном отношении не отличается от ДГБ аварии на территории резервуарного парка (рисунок 3.1), количественное отличие заключается в большем числе вариантов ГС. Здесь их восемь, поскольку два (-4,b и -4,c) отли-

чаются только вероятностью. В связи с этим далее приведем только результаты оценки целевых метрик возможных сценариев развития аварии.

*Сценарий аварии "Пожар пролива"*. Целевая метрика – интенсивность падающего на объект-мишень теплового потока  $I$ , кВт/м<sup>2</sup>.

Таблица 3.14 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Пожар пролива" для вариантов головного события аварии на территории сливо-наливной эстакады*

Вариант ГС /параметр	-3,b, -3,c	-3,d	-3,e	-3,f
Интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup>	[14.0, 14.1]	[14.0, 14.5]	[14.0, 14.1]	[7.7, 14.4]
Условная вероятность	[0.06, 0.3]	[0.06, 0.6]	[0.06, 0.3]	[0.16, 0.8]

Окончание таблицы 3.14

Вариант ГС /параметр	-3,g	-3,h	-3,i	-3,k
Интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup>	[14.0, 14.1]	[10.4, 18.1]	[14.5, 15.0]	[14.0, 14.1]
Условная вероятность	[0.06, 0.3]	[0.08, 0.4]	[0.06, 0.3]	[0.06, 0.3]

*Сценарий аварии "Длительное испарение пролива"*. Целевая метрика – интенсивность испарения  $w$ , кг/с·м<sup>2</sup>.

Таблица 3.15 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Длительное испарение пролива" для вариантов головного события аварии на территории сливо-наливной эстакады*

Вариант ГС /параметр	-3,b, -3,c	-3,d	-3,e	-3,f
Интенсивность испарения $w$ , кг/с·м <sup>2</sup>	[0.0001, 0.049]	[0.0001, 0.05]	[0.0001, 0.049]	[0.0001, 0.034]
Условная вероятность	[0.1, 0.5]	[0.1, 0.5]	[0.1, 0.5]	[0.02, 0.1]

Окончание таблицы 3.15

Вариант ГС /параметр	-3,g	-3,h	-3,i	-3,k
Интенсивность испарения $w$ , кг/с·м <sup>2</sup>	[0.0001, 0.054]	[0.0001, 0.048]	[0.0001, 0.04]	[0.0001, 0.05]
Условная вероятность	[0.1, 0.5]	[0.04, 0.2]	[0.1, 0.5]	[0.1, 0.5]

*Сценарий аварии "BLEVE"*. Целевые метрики – энергетический потенциал  $E_{\text{eff}}$ , Дж, скорость разлета осколков  $u_{\text{оск}}$ , м/с. В отличие от параметров данного сценария аварии на территории резервуарного парка, характеристики котла железнодорожной четырехосной цистерны отличаются от таковых у РГС-75: а) вместимостью  $V_{\text{ц}} \in [85.6, 88.0]$  м<sup>3</sup>; б) массой оболочки  $M_{\text{рез}} \in [23300, 23500]$  кг; в) диаметром предохранительно-впускного клапана  $d_j = 0.2$  м. Кроме того, котлы ж/д цистерн значительно прочнее резервуаров типа

РГС – при гидравлических испытаниях они должны выдерживать избыточное давление 4.0 МПа.

Массу бензина в цистерне на момент взрыва экспертно зададим широким интервалом  $m_{ж1} \in [200, 45000]$  кг. Анализ левой части ДГБ показывает, что эскалация аварии по механизму "домино" возможна при единственном варианте ГС – -3, f, при котором в огне пожара крупного пролива на сливной эстакаде окажется вторая железнодорожная цистерна.

Таблица 3.16 – **Целевая метрика и условная вероятность сценария "BLEVE" для единственного варианта головного события аварии на территории сливо-наливной эстакады**

Вариант/параметр	-3, f
Энергетический потенциал $E_{eff}$ , Дж	$[0.13, 8.0] \cdot 10^7$
Скорость разлета осколков $u_{оск}$ , м/с	[5.6, 12.3]
Условная вероятность	[0.056, 0.28]

Сценарий аварии "Огненный шар". Целевые метрики – интенсивность падающего на объект-мишень теплового потока  $I$ , кВт/м<sup>2</sup> и длительность свечения ОШ  $t$ , с.

Таблица 3.17 – **Целевые метрики и условная вероятность сценария "Огненный шар" для единственного варианта головного события аварии на территории сливо-наливной эстакады**

Вариант ГС /параметр	-3, f
Интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup>	[9.6, 65.3]
Длительность свечения ОШ $t$ , с	[3.4, 13.8]
Условная вероятность	[0.056, 0.28]

Сценарий аварии "Факельное горение паров". Целевая метрика – интенсивность падающего на объект-мишень теплового потока  $I$ , кВт/м<sup>2</sup>. С учетом величины уставки предохранительно-впускного клапана цистерны (1.5 МПа) истечение паровой струи возможно только в сверхкритическом режиме

Таблица 3.18 – **Целевая метрика сценария "Факельное горение паров" для единственного варианта головного события аварии на территории сливо-наливной эстакады**

Вариант ГС /параметр	-3, f
Интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup>	[16.2, 18.2]
Условная вероятность	[0.056, 0.28]

Сценарий аварии "Объемный взрыв ТВС". Результаты оценки целевых метрик – амплитуда избыточного давления  $\Delta P$ , Па, и импульс положительной фазы давления  $I$ , Па·с, приведены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – *Целевые метрики и условная вероятность сценария "Объемный взрыв паров" для вариантов головного события аварии на территории сливо-наливной эстакады*

Вариант ГС /параметр	-3,b, -3,c	-3,d	-3,e	-3,f
Избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа	[0.004, 0.25]	[0.0033, 0.5]	[0.004, 0.25]	[0.039, 1.89]
Импульс положительной фазы взрывной волны $\Gamma^+$ , Па·с	[0, 0.075]	[0, 0.31]	[0, 0.075]	[0.0042, 4.4]
Условная вероятность	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.01, 0.05]

Окончание таблицы 3.19

Вариант ГС /параметр	-3,g	-3,h	-3,i	-3,k
Избыточное давление взрыва $\Delta P$ , Па	[0.0022, 0.23]	[0.0047, 1.29]	[0.014, 0.71]	[0.0037, 0.2]
Импульс положительной фазы взрывной волны $\Gamma^+$ , Па·с	[0, 0.062]	[0, 2.1]	[0.0005, 0.61]	[0, 0.048]
Условная вероятность	[0.02, 0.1]	[0.04, 0.2]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]

*Сценарий аварии "Пожар-вспышка"*. Целевая метрика – радиус зоны воздействия продуктов сгорания  $R_{F,m}$ .

Таблица 3.20 – *Целевые метрики и условная вероятность сценария "Пожар-вспышка" для вариантов головного события аварии на территории сливо-наливной эстакады*

Вариант ГС /параметр	-3,b, -3,c	-3,d	-3,e	-3,f
Радиус зоны воздействия $R_{F,m}$	[0.35, 4.5]	[0.28, 9.2]	[0.35, 4.5]	[0.28, 39]
Условная вероятность	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]	[0.01, 0.05]

Окончание таблицы 3.20

Вариант ГС /параметр	-3,g	-3,h	-3,i	-3,k
Радиус зоны воздействия $R_{F,m}$	[0.18, 4.1]	[0.4, 24]	[1.3, 13]	[0.31, 3.6]
Условная вероятность	[0.02, 0.1]	[0.04, 0.2]	[0.02, 0.1]	[0.02, 0.1]

### 3.4 Анализ и количественная оценка неопределенности оценок параметров аварии на территории склада светлых нефтепродуктов

В разделах 3.1 – 3.3 третьей главы диссертации с использованием отечественных Руководств по КОР выполнены оценки параметров аварии на территории трех взрывопожароопасных объектов, расположенных на территории склада светлых нефтепродуктов. Учитывая: а) наличие в решаемой задаче параметрической неопределенности; б) отсутствие у величины параметров статистической устойчивости, последние были заданы интервальными числами (интервалами).

Все необходимые расчеты в рамках используемых физико-математических моделей взрывов и пожаров выполнялись методами интервального анализа, реализованными в пакете INTLAB версии 10.2. С целью минимизации вычислительной неопределенности интервальные расчеты выполнялись в аффинном представлении параметров, а также методами Рамона Мура и глобальной оптимизации.

### 3.4.1 Качественный анализ неопределенности

Собственно количественную оценку неопределенности полученных результатов должен предварять этап ее качественного анализа, [42, 43]. Следует подчеркнуть, что полученные в рамках рассмотренной задачи оценки неопределенности результатов неполны в силу следующих обстоятельств:

1) из четырех известных видов неопределенности, присущих пожарному риску (терминологическая, модельная, параметрическая и вычислительная) нами рассмотрены и количественно оценены только два последних;

2) не оценена сценарная неопределенность, обусловленная ограничением Руководствами по КОР как перечня вариантов ГС (левая часть), так и перечня сценариев развития аварии (правая часть ДГБ);

3) неизвестная по масштабу скрытая неопределенность заключается в точечных значениях ряда параметров, рекомендуемых Руководствами по КОР;

4) в большей части случаев область применимости используемых физико-математических моделей взрывов и пожаров Руководствами по КОР не сообщается, поэтому не исключено использование данных моделей вне рамок их валидности, [44].

Преобладающий вклад в неопределенность метрик аварийного риска, безусловно, принадлежит вероятности событий – как вариантов головного события аварии, так и сценариев ее дальнейшего развития. Наибольшей точностью (наименьшей неопределенностью) обладают оценки вероятности событий, подлежащих описанию вероятностными методами (когда условие статистической устойчивости соблюдено). К сожалению, для технологически сложных ВПОО это невозможно. Используемые взамен методы экспертного оценивания вероятности событий дают неопределенность, как правило, составляющую один-два порядка величины.

Неопределенность оценок целевых метрик сценариев аварии на складе нефтепродуктов во многом обусловлена неопределенностью физико-химических свойств обращающегося на нем опасного вещества – автомобильного бензина Аи-92. Тот факт, что бензин является смесью множества индивидуальных веществ, обусловил широкий ин-

тервал его молярной массы  $\mu \in [88.1, 149.7]$  кг/кмоль. Это, в свою очередь, повлекло за собой значительную ширину интервалов зависимых параметров – таких, например, как плотность его паров.

Кроме того, с целью придания задаче наибольшей реалистичности при выполнении количественных оценок ее внешним параметрам нами намеренно были приписаны максимально возможные диапазоны изменений их величины. Так, например, принято, что масса бензина в резервуаре в момент взрыва составляет интервал  $m \in [200, 40000]$  кг. Естественно, это оказало непосредственное влияние на величину неопределенности целевых метрик сценариев аварии.

### 3.4.2 Количественная оценка неопределенности

Интервальный подход не требует привлечения гипотез о закономерностях изменения величины параметров в пределах диапазонов их изменений, что выгодно отличает его от других способов задания параметрической неопределенности. Полученные оценки интервальных целевых метрик сценариев аварии приведены в соответствующих таблицах раздела 3.3 диссертации. Их ширина является прямой оценкой величины неопределенности метрик.

### 3.4.3 Оценка значимости параметров модели

Покажем, что, наряду с собственно КОН, интервальный подход позволяет решить и другие полезные для практики задачи, например, оценить значимость параметров (параметрическую чувствительность) используемых физико-математических моделей аварийных процессов. Для того, чтобы сделать это, в рамках данного подхода достаточно задать все прочие независимые входные параметры модели, кроме исследуемого, очень узкими интервалами. Ширина интервала полученной целевой метрики (отклик модели) будет непосредственно характеризовать параметрическую чувствительность модели к данному параметру, [45].

Покажем, как это работает на примере сценария "Объемный взрыв паров" для варианта (-3,f) ГС аварии на территории сливо-наливной эстакады. Для того, чтобы оставаться в рамках интервального подхода, вначале зададим все независимые входные параметры модели зауженными интервалами, середина которых оставлена прежней, а ширина уменьшена в сто раз: диаметр пролива  $d_{пр} \in [46.63, 46.64]$  м, температура воздуха  $T_{в} \in [285.8, 286.1]$  К; скорость ветра  $u_{w} \in [0.1237, 0.1263]$  м/с; продолжительность испарения пролива  $t_{исп} \in [1785, 1821]$  с; скорость фронта пламени  $u_{фр} \in [174.75, 175.25]$  м/с; молярная масса бензина  $\mu \in [118.6, 119.2]$  кг/кмоль; теплотворная способность бензина

$H_c \in [42.48, 42.52]$  МДж/кг; НКПР бензина  $\in [1.009, 1.010]$  %, стехиометрическая концентрация  $C_{ст} \in [2.065, 2.075]$  %. При этом относительная ширина данных интервалов  $\delta = \text{rad}(I)/\text{mid}(I)$ , ( $\text{rad}(I)$  – радиус интервала,  $\text{mid}(I)$  – его ширина) составляет 1% и менее. При указанных значениях входных параметров нами получено значение прогнозируемого избыточного давления взрыва на удалении 100 м  $\Delta P \in [864, 894]$  Па, его относительная ширина всего 1.7%.

Далее, задавая по одному входные параметры полными интервалами, получим отклики целевой метрики, значения которых в порядке убывания чувствительности физико-математической модели взрыва ТВС отразим в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – *Оценка значимости параметров модели*

Варьируемый параметр	Отклик целевой метрики $\Delta P$ , Па	Относительная ширина отклика, $\text{rad}(I)/\text{mid}(I)$ , %
Все входные параметры "заужены" стократно	[864, 894]	1.7
Длительность испарения, $t_{исп} \in [6, 3600]$ с	[121, 1190]	81.4
Скорость ветра $u_w \in [0, 0.25]$ м/с	[536, 1132]	35.7
Скорость фронта пламени $u_{фр} \in [150, 200]$ м/с	[594, 1235]	35.1
Молярная масса $\mu \in [88.1, 149.7]$ кг/кмоль	[730, 1023]	16.7
Температура воздуха $T_v \in [273, 299]$ К	[806, 948]	8.1

Анализ таблицы говорит о том, что модель предсказуемо наиболее чувствительна к продолжительности испарения пролива, на втором месте по чувствительности – скорость ветра.

### 3.4.4 Консервативность допущений

В первоначальный период развития риск-ориентированного подхода в области техногенной безопасности часто рекомендовался т.н. консервативный подход, в рамках которого для расчета целевых показателей риска всем входным параметрам задачи присваивались их экстремальные значения (в зависимости от их влияния на величину целевой метрики сценария). Подобные точечные оценки легко могут быть выполнены в рамках интервального метода. Для этого следует приписать входным параметрам задачи значения, соответствующие либо верхней, либо нижней границе их интервалов (в зависимости от влияния данного параметра на величину целевой метрики).

Выполним это для сценария аварии "Объемный взрыв облака ТВС". Сначала получим точечную консервативную оценку избыточного давления взрыва, приписав всем входным параметрам, кроме НКПР, максимальные значения: диаметру пролива 47.2 м, температуре воздуха 299 К; скорости ветра 0.25 м/с; продолжительности испарения пролива 3600 с;

скорости фронта пламени 200 м/с; молярной массе бензина 149.7 кг/кмоль; теплотворной способности бензина 44 МДж/кг; стехиометрической концентрации его паров 2.57%, а для НКПР бензина принимаем минимальное значение 0.96 %.

При данных значениях входных параметров полученная нами точечная оценка прогнозируемого избыточного давления взрыва на удалении 100 м равна  $\Delta P = 2.44$  кПа, что примерно на 10% меньше верхней границы полученной нами выше интервальной оценки  $\Delta P \in [0.017, 2.7]$  кПа.

Теперь проделаем аналогичное сравнение точечных "консервативных" оценок целевых метрик для четырех других сценариев аварии с полученными нами ранее их интервальными оценками и отразим полученные результаты в таблице 3.22.

Таблица 3.22 – *Сравнение результатов расчета целевых метрик ряда сценариев аварии*

Сценарий аварии, целевая метрика	Интервальный расчет	"Консервативный" точечный расчет
Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м <sup>2</sup>	[7.7, 14.4]	14.4
Огненный шар, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м <sup>2</sup>	[9.6, 65.3]	65.3
Факельное горение струи, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м <sup>2</sup>	[16.2, 18.2]	18.2
Объемный взрыв ТВС, избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа	[0.017, 2.7]	2.44
Пожар-вспышка, радиус зоны воздействия R <sub>F</sub> , м	[1.3, 158]	122

Таблица 3.22 демонстрирует, что в двух из пяти рассмотренных сценариев аварии точечные "консервативные" значения целевых метрик оказались на 10 – 30% меньше верхних границ их интервальных оценок. Таким образом, "консервативные" точечные оценки поражающих факторов аварии оказалась не вполне консервативными, [45].

Данный факт легко может быть объяснен тем обстоятельством, что только монотонные функции достигают своих экстремальных значений на границах области определения. В общем случае немонотонных функций это не так. В то же время в рамках интервального подхода метод глобальной оптимизации позволяет гарантированно найти границы (min и max) области значений целевой функции любого типа.

### 3.4.5 Способ улучшения интервальных оценок

В нашей статье [45] предложен метод, позволяющий сузить ширину результата интервальных расчетов, если имеется статистическая информация о поведении величины параметров в пределах своих интервалов. Покажем на условном примере, как он работает. Принято допущение, что достоверно известна следующая информация: а) статистика величины объема хранения автомобильного бензина в некоем резервуаре РВС-2000 (таблица 3.23); б) плотность вероятности распределения температуры атмосферного воздуха в месте его расположения. Допущение (а) предполагает, что по эксплуатационным данным известно, какую долю времени количество бензина в резервуаре находится в пределах, указанных в строках таблицы 3.23.

Далее, принято, что в Республике Марий Эл среднесуточная температура воздуха подчиняется распределению Гаусса со средним  $\bar{T}_в = 286$  К и СКО  $\sigma_T = 6$  К. Была построена соответствующая дискретная плотность вероятности с шагом 1 К, после чего она была нормирована с тем, чтобы площадь гистограммы оказалась равной 1,0.

Таблица 3.23 – *Имеющаяся статистическая информация об объемах хранения нефтепродукта*

Объем хранения м <sup>3</sup>	Доля времени, процентов
200 ÷ 400	6
400 ÷ 600	9
600 ÷ 1600	73
1600 ÷ 1900	8
1900 ÷ 2000	4

Рассмотрим гипотетическую аварию – катастрофическое разрушение резервуара. Вначале выполним оценку избыточного давления объемного взрыва паров бензина на удалении 100 м для головного события аварии, заключающегося в разрушении резервуара при полном диапазоне объема хранения  $V_{хр} \in [200, 2000]$  м<sup>3</sup>, т.е. без учета статистической информации о температуре воздуха и объемах хранения. Расчеты выполним, как и выше, методами Р.Мура и, в ряде случаев – глобальной оптимизации, для элементов бруса размерности 26×1.

Результат оценки целевой метрики (интервальная оболочка)  $\Delta P_1 \in [52, 5112]$  Па.

Далее с учетом независимости температуры воздуха и объема хранения построим двумерную матрицу 26×5 совместных вероятностей, каждый элемент которой равен произведению соответствующих элементов векторов вероятностей температуры и объемов хранения. Теперь выполним отсечку элементов этой матрицы, задаваясь определенным уровнем значимости:

сумма вероятностей элементов матрицы, больших 0.0025 примерно равна 0.95;

0.0035	0.9;
0.006	0.8.

На следующем шаге получим матрицу  $26 \times 5$  избыточного давления взрыва, соответствующих 26-ти подинтервалам температуры атмосферного воздуха и пяти вариантам головного события аварии, указанных в таблице 3.23. Теперь, приравняв избыточное давление для элементов матрицы, совместная вероятность которых меньше соответственно, 0.0025 0.0035 и 0.006 среднему значению  $\text{mid}(\Delta P_1)$ , получим интервальные оболочки соответствующих матриц избыточного давления с отсечкой.

Полученные результаты:  $\Delta P_{95} \in [55.5, 4750]$  Па;  $\Delta P_{90} \in [56.0, 4700]$  Па;  $\Delta P_{80} \in [70, 4670]$  Па показывают, что использование имеющейся статистической информации позволяет существенно повысить качество интервальных оценок.

### 3.5 Оценка параметров аварии на ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция"

Автомобильная газозаправочная станция (АГЗС) предназначена для круглосуточного отпуска автотранспортным средствам сжиженного углеводородного газа (СУГ). На территории АГЗС расположены:

- металлический навес с размещенным под ним оборудованием:
  - сосуд для СУГ объемом  $22 \text{ м}^3$ , выполненный как автомобильный полуприцеп;
  - центробежный насос НСВГ для перекачивания СУГ;
  - заправочные колонки УИЖГ-20-02 и УЗСГ-1 со счетчиками газа;
  - контрольные приборы, запорная арматура, устройства безопасности;
- площадка ожидания пассажиров.

Территория ВПОО имеет твердое асфальтобетонное покрытие, ограждена металлическим забором, оборудована наружным освещением.

Резервуар с СУГ на объекте сменный, при опорожнении резервуар обычно заменяется заполненным. Однако изредка пополнение резервуара осуществляется на месте, из другого передвижного сосуда, устанавливаемого рядом с эксплуатируемым.

Опишем устройства взрывопожарной безопасности, имеющиеся на данном ВПОО:

а) с целью предотвращения разгерметизации сосуда и магистралей транспортирования СУГ имеются:

- на резервуаре – два предохранительных клапана ( $D_y$  32 мм,  $P_{cp} = 1,8$  МПа);
  - на патрубке слива – клапан КПУ  $D_y$  50 мм и электромагнитный клапан-отсекатель нормально закрытого типа;
  - на патрубке налива – клапан КПУ  $D_y$  50 мм и электромагнитный клапан-отсекатель нормально закрытого типа;
  - на рукаве паровой фазы – электромагнитный клапан-отсекатель нормально закрытого типа, принудительно открываемый только на время пополнения резервуара;
  - герметичный корпус, в который заключен насосный агрегат НСВГ;
- б) с целью ограничения площади пролива СУГ по периметру сосуда выполнено бетонное обвалование с размерами в плане  $4.6 \times 16$  м и высотой бортика 20 см ((площадью  $S_{об} = 73.6$  м<sup>2</sup> и вместимостью  $V_{об} = 14.7$  м<sup>3</sup>);
- в) с целью предотвращения взрыва паров СУГ:
- имеется устройство заземляющее для автоцистерн;
  - внутри заправочных шлангов с целью обеспечения электростатической безопасности протянута медная жила сечением 4 мм<sup>2</sup>, по наружной поверхности сливно-наливных рукавов выполнена оплетка медной проволокой с шагом 100 мм;
  - в нижней части основания насосного агрегата и в зоне расположения сосуда смонтированы два датчика довзрывных концентраций горючих газов. При срабатывании любого из них автоматически блокируется работа насосного агрегата, закрываются электромагнитные клапаны-отсекатели и раздается сигнал громкого боя. Согласно требованиям ГОСТ 27540-87 [19] стандартная уставка порога срабатывания датчика до-взрывных концентраций горючих газов составляет 20% НКПР;
  - защита ВПОО от молнии осуществляется двумя одиночными стержневыми молниеприемниками высотой 11 м и металлическим глухозаземленным навесом. В соответствии с требованиями ФНП [115] во время грозы сливноналивные операции на АГЗС не выполняются.

Будем считать, что из пяти марок СУГ, перечисленных в ГОСТ Р 52087-2003 [29], которые могут применяться в качестве моторного топлива, на рассматриваемой АГЗС используется пропан-бутан автомобильный (ПБА), являющийся смесью пропана и бутана в равных долях.

Проанализируем источники зажигания, которые могут возникнуть на территории АГЗС. В общем случае в качестве ИЗ при пожарах (взрывах) рассматривают, [16]:

- прямой удар молнии;
- вторичное воздействие молнии;
- занос высокого потенциала;
- электрическая искра (дуга);
- термическое действие токов короткого замыкания;
- электрические искры (капли металла);
- электрические лампы накаливания общего назначения;
- искры статического электричества;
- механические (фрикционные) искры (от удара и трения);
- открытое пламя и искры двигателей (печей);
- нагрев веществ, узлов и поверхностей технологического оборудования.

Рассмотрим, какие из вышеперечисленных ИЗ могут стать причинами взрыва (пожара) на рассматриваемом взрывопожароопасном объекте:

- прямой удар молнии – возможен;
- вторичное воздействие молнии – невозможно, поскольку индукционное воздействие разряда молнии может иметь место при наличии замкнутых токопроводящих контуров, площадь которых превышает пороговую, и искровых промежутков;
  - занос высокого потенциала – невозможен, поскольку это явление может возникнуть в момент удара молнии при наличии протяженных металлических коммуникаций, не обеспеченных заземлением;
  - электрическая искра (дуга) – только искры работающего стартера автомобиля, если водитель начнет запуск двигателя при наличии пролива СУГ. Прочие виды электрических искр не рассматриваются, т.к. на АГЗС отсутствует электрооборудование, способное образовать искры (электропривод насоса НСВГ выполнен во взрыво- искробезопасном исполнении, кожух насоса герметичен);
    - термическое действие токов короткого замыкания – не учитывается, т.к. электрооборудование на рассматриваемом объекте выполнено по повышенному классу защиты, контактные соединения находятся внутри герметичного корпуса;
    - электрические лампы накаливания общего назначения – не учитываются, поскольку на объекте они не используются;
    - искры статического электричества – возможны вследствие человеческого фактора (неиспользования персоналом устройства заземляющего для автоцистерн);

- механические (фрикционные) искры (искры от удара и трения) – не учитываются, поскольку металлические наконечники топливных шлангов выполнены в искробезопасном исполнении; покрытие дорожного полотна искробезопасное (асфальтобетон), применение ударного инструмента категорически запрещено инструкцией по безопасному проведению работ;

- открытое пламя и искры двигателей (печей) – возможны, поскольку выхлопные трубы автогазовозов в обязательном порядке оснащаются искрогасителями, однако заправляемые автомобили ими не оборудованы;

- нагрев веществ, отдельных узлов и поверхностей технологического оборудования. С учетом температуры самовоспламенения компонентов СУГ (405 – 470 °С) будем считать, что на АГЗС отсутствуют тепловые ИЗ, поскольку температура наиболее горячей части системы выпуска отработавших газов автомобильного двигателя – приемного коллектора – в летний период не превышает 400 °С.

ДГБ взрыва (пожара) на рассматриваемом АЗГЗС представлена на рисунке 3.7. На диаграмме не учтены ГС, связанные с разгерметизацией участка газовой магистрали от насоса до баллона заправляемого автомобиля, т.к. совокупный объем этих участков составляет примерно 3 л.

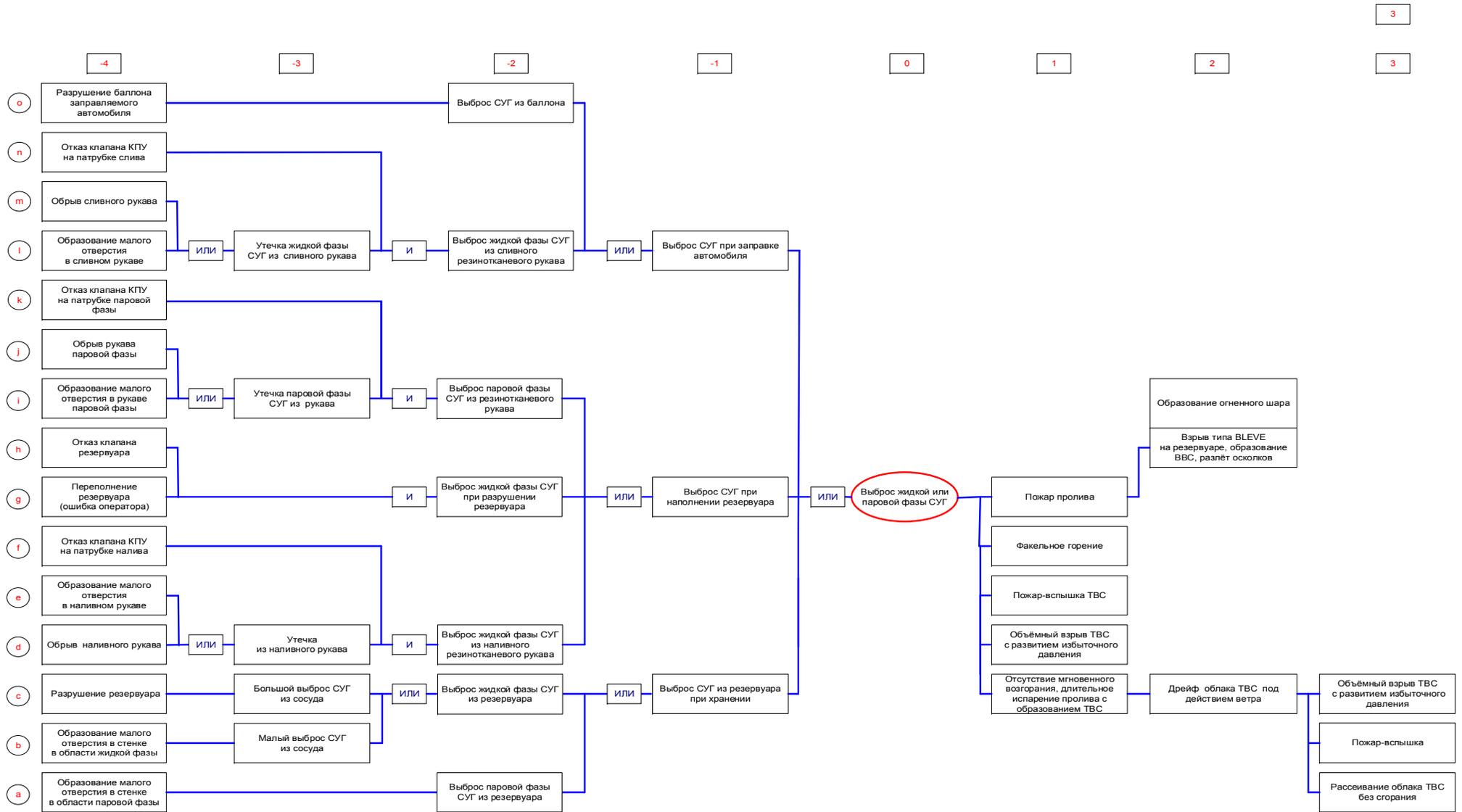


Рисунок 3.7 – ДГБ аварии на территории АГЗС

### 3.5.1 Оценка параметров головного события аварии

Для оценки вероятностей вариантов ГС аварии воспользуемся справочными данными об интенсивностях (вероятностях) отказов элементов:

Таблица 3.24 – *Интенсивность (вероятность) отказов элементов*

Наименование элемента	Интенсивность (вероятность) отказов	Источник данных
Разрушение резервуара, работающего под давлением	$5 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$	[93]
Утечка из резервуара через отверстие диаметром 50 мм	$5 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$	[93]
Обрыв сливоналивного рукава	$4 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	[93]
Утечка из сливоналивного рукава через отверстие диаметром 38 мм	$4 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$	[93]
Клапаны сверхскоростные	$[1.33, 5.33] \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1} *$	[16]
Клапаны наполнительные	$[0.1, 1.12] \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1} *$	[16]
Клапаны с электромагнитным приводом	$[0.07, 2.96] \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1} *$	[86]
Датчики до взрывных концентраций горючих газов	0,00001**	[16]

*Примечания: \* вообще говоря, для устройств безопасности вместо интенсивности отказов более осмысленным параметром является вероятность отказа на требование, однако отечественные справочники по надежности подобную информацию не предоставляют*  
 \*\* известно, что для экспоненциального закона распределения вероятности отказов средняя наработка до первого отказа  $T_{cp}$  и интенсивность отказов  $\lambda$  связана соотношением  $\lambda = 1/T_{cp}$ . Характерная наработка до первого отказа датчиков до взрывных концентраций составляет 100000 ч. Следовательно,  $\lambda = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

Прежде выполнения количественных оценок зададим значения входных параметров задачи, начав с параметров природно-эксплуатационного типа:

- температура атмосферного воздуха. Согласно требованиям ГОСТ Р 52087-2003 [29] ПБА может использоваться в качестве моторного топлива при температурах атмосферного воздуха не ниже  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому принимаем  $T_B \in [253, 299] \text{ K}$ ;
- скорость ветра  $u_w \in [0, 9] \text{ м/с}$ ;
- количество СУГ в резервуаре. С учетом геометрического объема котла резервуара ( $21,3 \text{ м}^3$ ) и максимально допустимой степени его заполнения 0.85 [20], количество ПБА в сосуде  $V_{\text{хр.суг}} \in [0, 18.1] \text{ м}^3$ ;
- величина эксплуатационного расхода жидкой фазы СУГ при операциях наполнения резервуара  $G_{\text{лж.суг}} \in [20, 40] \text{ л/мин}$ ;
- величина эксплуатационного расхода паровой фазы СУГ при наполнении сосуда  $G_{\text{г.суг}} \in [10, 40] \text{ л/мин}$ ;

- величина эксплуатационного расхода жидкой фазы СУГ при заправке автомобиля  $G_{2ж.суг} \in [12, 18]$  л/мин.

Ряд внешних параметров рассматриваемой задачи задан вырожденными интервалами:

- плотность СУГ при 0 °С. Приняв по ГОСТ 27578-87 [20], что при температуре 273 К плотность жидкой фазы  $\rho_{ж.проп} = 510$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{ж.бут} = 580$  кг/м<sup>3</sup>, получаем оценку плотности ПБА  $\rho_{ж.суг} = 545$  кг/м<sup>3</sup>. Аналогично, для паровой фазы:  $\rho_{г.проп} = 2.02$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{г.бут} = 2.7$  кг/м<sup>3</sup>, [20];

- удельная теплота испарения:  $\Delta H_{исп.проп} = 4.19 \cdot 10^5$  Дж/кг,  $\Delta H_{исп.бут} = 3.86 \cdot 10^5$  Дж/кг, [20];

- удельная теплоемкость:  $C_{ж.проп} = 2.75 \cdot \kappa$  Дж/кг,  $C_{ж.бут} = 2.44 \cdot \kappa$  Дж/кг,  $C_{рг.проп} = 1.67 \cdot \kappa$  Дж/кг,  $C_{рг.бут} = 1.7 \cdot \kappa$  Дж/кг, [127];

- удельная теплота сгорания:  $H_{с.проп} = 46.25 \cdot 10^6$  Дж/кг,  $H_{с.бут} = 45.71 \cdot 10^6$  Дж/кг, [75], с учетом содержания компонентов в ПБА  $H_{с.суг} = 46.02 \cdot 10^6$  Дж/кг;

- температура кипения:  $T_{кип.проп} = 231$  К,  $T_{кип.бут} = 272.5$  К, [20];

- температура самовоспламенения:  $T_{св.проп} = 739$  К,  $T_{св.бут} = 678$  К, [20];

- молярная масса:  $\mu_{проп} = 44.1$  кг/кмоль·К,  $\mu_{бут} = 58.1$  кг/кмоль·К, так что  $\mu_{суг} = 50.1$  кг/кмоль·К;

- молярная масса воздуха,  $\mu_v = 29$  кг/кмоль;

- молярная концентрация газов в ПБА: в 1 кг ПБА 0.5 кг пропана и 0.5 кг бутана, число молей – пропана  $0.5/0.0441 = 11,34$  молей, бутана –  $0.5/0.0581 = 8,6$  молей, всего 19.94 молей. Следовательно, молярная концентрация в ПБА  $C_{\mu.проп} = 11.34/19.94 = 0.569$ ,  $C_{\mu.бут} = 8.6/19.94 = 0.431$ ;

- НКПР:  $C_{нкпр.проп} = 2.1$  об.%,  $C_{нкпр.бут} = 1.5$  об.%, [73];

- критические параметры: а) критическая температура  $T_{кр.проп} = 370$  К,  $T_{кр.бут} = 425.2$  К; б)  $P_{кр.проп} = 1.5$  МПа,  $P_{кр.бут} = 3.8$  МПа, [127];

- константы корреляции KDB для расчета температурной зависимости давления насыщенных паров алканов: пропан –  $A = -5.3955$ ,  $B = -3384.0$ ,  $C = 48.1426$ ;  $D = 9.1321 \cdot 10^{-6}$ ; н-бутан –  $A = -6.9223$ ,  $B = -4346.6$ ,  $C = 58.702$ ;  $D = 9.1527 \cdot 10^{-6}$ , [182];

- коэффициент объемного расширения:  $\beta_{проп} = 0.003$  К<sup>-1</sup>,  $\beta_{бут} = 0.002$  К<sup>-1</sup>, [127];

- коэффициент Пуассона для ПБА, являющейся смесью двух многоатомных газов, зададим величиной  $\gamma_{суг} = 1.11$ ;

- коэффициент теплопроводности асфальтобетона  $\lambda_s = 1.05$  Вт/м·К согласно Приложению 3 [103];

- удельная теплоемкость асфальтобетона  $C_s = 1.68$  кДж/кг·К, [127];

- плотность асфальтобетона  $\rho_s = 2100 \text{ кг/м}^3$ , [127];
- $C_v$  – молярная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, Дж/моль·К. Справочник [110] сообщает значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении  $c_p = 0.24 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$ , которое в пересчете дает величину  $C_v = 20.7 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ ;
- масса котла сосуда  $m_{\text{сос}} = 4600 \text{ кг}$ ;
- эксплуатационные параметры работы АГЗС: частота замены резервуаров – один раз в трое суток, примерно  $N_{\text{зам.рез}} = 100$  раз за год; частота пополнения резервуара на территории объекта – в среднем  $N_{\text{зап.рез}} = 30$  операций в течение года, продолжительность каждой –  $\tau_{\text{зап.рез}} = 30$  минут (итого,  $T_{\text{зап.рез}} = 15 \text{ ч/год}$ ); средняя продолжительность заправки одного автомобиля – 4.2 мин; среднее количество заправляемых автомобилей в год – 25000 ( $T_{\text{зап.авт}} = 1750 \text{ ч/год}$ ); карта рабочего времени наполнителя баллонов (10% – на территории АГЗС, 30% – возле заправочных колонок и сосуда, 60% – в операторной); водители (два человека) находятся в здании отдыха водителей примерно 730 ч/год; средняя продолжительность нахождения пассажиров на площадке ожидания 1040 ч/год;
- технические параметры оборудования: а) магистрали для СУГ (слива, налива, паровой фазы) выполнены из резиноканевого рукава диаметром  $d_{\text{рук}} = 38 \text{ мм}$  и длиной  $L_{\text{рук}} = 7,5 \text{ м}$ ; б) СУГ от насоса к колонкам подается по стальным трубопроводам наружным диаметром  $d_{\text{тр}} = 25 \text{ мм}$  длиной  $L_{1\text{тр}} = 2 \text{ м}$  и  $L_{2\text{тр}} = 3 \text{ м}$ , к баллону заправляемого автомобиля – по шлангам высокого давления внутренним диаметром  $d_{\text{шл}} = 18 \text{ мм}$  длиной 3 м.

Таблица 3.25 – *Оценки вероятности вариантов ГС аварии на территории АГЗС*

Событие левой части ДГБ		Вариант ГС аварии		
номер	вероятность	номер	описание	вероятность
-4,a	$5 \cdot 10^{-7}$	-2,a	длительное истечение паровой струи СУГ из отверстия в резервуаре	$5 \cdot 10^{-7}$
-4,b	$5 \cdot 10^{-7}$	-2,b	длительное истечение двухфазной струи СУГ из отверстия в резервуаре	$2.5 \cdot 10^{-7}$
-4,c	$5 \cdot 10^{-7}$	-2,c	мгновенный выброс СУГ, образование первичного и вторичного облаков	$5 \cdot 10^{-7}$
-4,d	$6 \cdot 10^{-5}$	-2,d	непродолжительный выброс двухфазной струи при обрыве рукава	$[1.2, 4.8] \cdot 10^{-9}$
			продолжительный выброс двухфазной струи при обрыве рукава	$[0.12, 21] \cdot 10^{-14}$
-4,e	$6 \cdot 10^{-4}$	-2,e	непродолжительный выброс двухфазной струи СУГ из отверстия в рукаве	$[1.2, 4.8] \cdot 10^{-8}$
			длительное истечение двухфазной струи СУГ из отверстия в рукаве	$[0.12, 21] \cdot 10^{-13}$
-4,f	$[0.2, 0.8] \cdot 10^{-4}$			

Окончание таблицы 3.25

Событие левой части ДГБ		Вариант ГС аварии		
-4,g	[0.003, 0.0045]	-2,g	мгновенный выброс СУГ, образование первичного и вторичного облаков	$[0.06, 12] \cdot 10^{-13}$
-4,h	$[1.5, 17] \cdot 10^{-6}$			
-4,i	$6 \cdot 10^{-4}$	-2,i	длительное истечение паровой струи СУГ из отверстия в рукаве	$[0.12, 21] \cdot 10^{-13}$
-4,j	$6 \cdot 10^{-5}$	-2,j	непродолжительный выброс паровой струи при обрыве рукава	$[1.2, 4.8] \cdot 10^{-9}$
			продолжительный выброс паровой струи при обрыве рукава	$[0.12, 21] \cdot 10^{-14}$
-4,k	$[0.2, 0.8] \cdot 10^{-4}$			
-4,l	0.068	-2l	непродолжительный выброс двухфазной струи СУГ из отверстия в рукаве	$[1.3, 5.4] \cdot 10^{-6}$
			длительное истечение двухфазной струи СУГ из отверстия в рукаве	$[0.014, 2.4] \cdot 10^{-10}$
-4,m	0.007	-2m	непродолжительный выброс двухфазной струи СУГ при обрыве рукава	$[1.4, 5.5] \cdot 10^{-7}$
			длительное истечение двухфазной струи СУГ при обрыве рукава	$[0.14, 25] \cdot 10^{-12}$
-4,n КПУ ЭМК	$[2.3, 9.3] \cdot 10^{-3}$ $[1.0, 44] \cdot 10^{-6}$			
-4,o	$2 \cdot 10^{-7}$	-2,o	мгновенный выброс СУГ, образование первичного и вторичного облаков	$2 \cdot 10^{-7}$

Численные оценки, указанные в таблице 3.25, получены при следующих допущениях: а) экспоненциальный закон распределения вероятности отказов; б) значения интенсивности отказов элементов оборудования из таблицы 3.24; в) электромагнитный клапан отработывает с некоторой задержкой (2 – 4 с) после начала истечения двухфазной струи СУГ из рукава.

Принимая во внимание полученную выше оценку  $V_{\text{хр.суг}}$  и зависимость плотности ПБА от температуры, получаем диапазон массы СУГ в сосуде  $m_{\text{суг}} \in [0, 1.04 \cdot 10^4]$  кг.

Перейдем к оценке масштаба вариантов ГС аварии – массового расхода СУГ при истечении, массы и площади его мгновенного выброса.

*Вариант -2,а* ГС (утечка паровой фазы СУГ через отверстие в стенке резервуара). Массовая скорость истечения паровой фазы  $G_v$ , кг/с, может быть найдена по формуле (2.21). Давление в резервуаре равно взвешенной сумме давлений насыщенных паров пропана и бутана. Ввиду сильной зависимости  $P_v$  от температуры разобьем интервал  $T_v$  на 46 подинтервалов длиной 1 К каждый и рассчитаем давление паров пропана и бутан

для каждого из них по корреляции KDB (3.31), опубликованной на сайте CHERIC (Chemical Engineering and Material Research Information Center) [182]:

$$\ln P_v = A \cdot \ln T + B / T + C + D \cdot T^2, \quad (3.31)$$

где  $[P_v] = \text{кПа}$ ;  $[T] = \text{К}$ , для которой указаны следующие пределы применимости: для пропана  $T \in [85, 370] \text{ К}$ ; бутана  $T \in [135, 425] \text{ К}$ .

Результатом расчета по (3.31) является 46-ти компонентные брусы  $P_v$  с интервальной оболочкой: для пропана  $P_{v.\text{проп}} \in [239, 995] \text{ кПа}$ ; бутана  $P_{v.\text{бут}} \in [44, 256] \text{ кПа}$ . Давление в резервуаре  $P_{v.\text{СУГ}}$  может быть рассчитано по закону Дальтона как сумма парциальных давлений пропана и бутана, интервальная оболочка  $P_{v.\text{СУГ}} \in [283, 1251] \text{ кПа}$ . Теперь есть возможность рассчитать массовый расход паровой фазы СУГ при истечении из аварийного отверстия по (2.21), интервальная оболочка соответствующего 46-ти компонентного бруса  $G_v \in [0.45, 4.1] \text{ кг/с}$ .

*Вариант -2,б* ГС (утечка жидкой фазы  $\rightarrow$  двухфазная струя через отверстие в стенке резервуара). Массовую скорость ее истечения,  $G_l$ , кг/с, оценим по соотношению (2.22). С учетом сильной зависимости плотности обеих фаз СУГ от температуры выполним расчеты этих параметров для 46-ти компонентов бруса  $T_v$  методом глобальной оптимизации. Итогом расчета является 46-ти компонентный брус  $G_l$  с интервальной оболочкой  $G_l \in [2.1, 16.9] \text{ кг/с}$ .

*Вариант -2,с* ГС (квазимгновенный выброс содержимого резервуара при разрушении последнего). При мгновенном выбросе ее часть  $\delta$  мгновенно испаряется, образуя парокапельную смесь, остальная ее часть сформирует пролив. Размер доли  $\delta$  зависит от температуры (воздуха, СУГ) на момент аварии, являясь 46-ти компонентным брусом. Согласно расчету по (2.23) для температур воздуха, меньших 298 К, расчетные значения  $\delta < 0.35$  (интервальная оболочка  $\delta \in [0.13, 0.356]$ ). Таким образом, масса пара в первичном облаке (сумма пара в паровом пространстве резервуара и мгновенно испарившегося) в данном варианте ГС будет зависеть от: а) соотношения масс фаз в резервуаре; б) температуры воздуха на момент аварии (разницей температур воздуха и СУГ в резервуаре пренебрежем). Методом глобальной оптимизации получены интервальные оценки массы первичного пара  $m_{\text{пп}}$  для 46-ти подинтервалов температуры воздуха с интервальной оболочкой  $m_{\text{пп}} \in [142.7, 3373.1] \text{ кг}$ .

Неиспарившаяся часть жидкой фазы сформирует пролив, который будет испаряться за счет теплопритока от подстилающей поверхности (асфальтобетона). Согласно расчету объем  $V_{\text{ж}}$  неиспарившейся мгновенно жидкой фазы ПБА составит, в зависимости от тем-

пературы, от  $V_{ж} \in [0, 11.7] \text{ м}^3$  до  $V_{ж} \in [0, 15.7] \text{ м}^3$ . Следовательно, с учетом объема обвалования ( $V_{об} = 14.7 \text{ м}^3$ ), часть СУГ может вытечь на его пределы. Совокупную площадь пролива  $S_{пр}$ ,  $\text{м}^2$ , можно оценить с учетом результатов опытов "Газ де Франс", согласно которым толщина слоя  $\delta_{сл}$  жидкого метана при растекании на бетоне  $\delta_{сл} = 0.003 \text{ м}$ , [98]:

$$S_{пр} = \begin{cases} S_{об} + \frac{V_{ж} - V_{об}}{\delta_{сл}}, & \text{при } \sup(V_{ж}) > V_{об}; \\ S_{об}, & \text{при } \sup(V_{ж}) \leq V_{об}; \end{cases} \quad (3.32)$$

При принятых допущениях площадь зеркала пролива составит 46-ти компонентный брус с интервальной оболочкой  $S_{пр} \in [0, 407.2] \text{ м}^2$ .

Для расчета удельной массовой скорости испарения  $w$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , СУГ со свободной поверхности пролива воспользуемся корреляцией (2.49) из [61]. Известно, [127], что для "разреженных" газов (до давлений 1 МПа) коэффициент теплопроводности воздуха  $\lambda_{в}$  может быть с хорошей точностью оценен по формуле Эйкена:

$$\lambda_{в} = \frac{100 \cdot \psi_{в} \cdot C_v}{\mu_{в}} \cdot \left( 1 + \frac{2.25 \cdot \hat{R}}{C_v} \right), \quad (3.33)$$

где  $\psi_{в}$  – динамическая вязкость воздуха (46-ти компонентный брус), которая, в свою очередь, может быть оценена по формуле Сазерленда (3.10). Результат расчета  $\psi_{в}$  – 46-ти компонентный брус с интервальной оболочкой  $\psi_{в} \in [1.64, 1.87] \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Интервальная оболочка коэффициента теплопроводности воздуха, рассчитанного нами по (3.33), составила  $\lambda_{в} \in [0.0022, 0.0026] \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ .

В разделе 2.6 уже указывалось на неопределенность в задании величины скорости воздушного потока над поверхностью пролива. В этой связи несколько условно примем, что  $u = u_1$  (средней скорости воздушного потока на высоте 1 м). Величина  $u_1$  может быть найдена из вертикального профиля средней скорости ветра  $u_w(z)$  в приземном слое атмосферы:

$$u_w(z) = u_1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}. \quad (3.34)$$

Задав высоту слоя шероховатости для пролива  $z_0 \in [0.01, 0.03] \text{ м}$ , получаем с учетом принятого нами  $u_w \in [0, 9] \text{ м}/\text{с}$  оценку  $u_1 \in [0, 7.1] \text{ м}/\text{с}$ ;

Теперь по (2.49) может быть оценена величина удельной массовой скорости испарения СУГ из пролива по модели Кавамуры-МакКея. Будем рассматривать этот процесс как аддитивный для пропана и бутана с учетом того обстоятельства, что в диапазоне температур  $[\inf(T_b), T_{b, \text{бут}}]$  К кипит только пропан и  $w = w_{\text{проп}}$ , а выше 272.5 К  $w = C_{\text{мпроп}} \cdot w_{\text{проп}} + C_{\text{мбут}} \cdot w_{\text{бут}}$ .

Зададим время с момента начала пролива:

а)  $t = 10$  с. Итогом расчета  $w_{\text{проп}}$  для пропана является 46-ти компонентный брус с интервальной оболочкой  $w_{\text{проп}} \in [0, 0.057]$  кг/м<sup>2</sup>·с, бутана – 26-ти компонентный брус с интервальной оболочкой  $w_{\text{бут}} \in [0, 0.024]$  кг/м<sup>2</sup>·с; интервальные оболочки совокупной интенсивности испарения СУГ  $w_{\text{СУГ}} \in [0, 0.042]$  кг/м<sup>2</sup>·с, массовой скорости испарения  $W_{\text{СУГ}} \in [0, 4.4]$  кг/с;

б)  $t = 20$  с:  $w_{\text{СУГ}} \in [0, 0.03]$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $W_{\text{СУГ}} \in [0, 3.1]$  кг/с.

*Варианты -2,d, -2,e, -2,l, -2,m* ГС (истечение жидкой фазы → двухфазная струя СУГ из рукава). Для расчета массовой скорости  $G_l$ , кг/с, истечения воспользуемся формулой (6-7) [92]:

$$G_l = \frac{\pi \cdot A_s \cdot d_{\text{рук}}^{0.3} \cdot (2 \cdot \rho_l \cdot (P_v - P_a))^{0.5}}{2 \cdot L_{\text{рук}}^{0.3}}, \quad (3.35)$$

где  $A_s$  – площадь аварийного отверстия, м<sup>2</sup>;

$L_{\text{рук}}$  – длина рукава до отверстия,  $L_{\text{рук}} \in [1, 7.5]$  м.

Результатом расчета является 46-компонентный брус с интервальной оболочкой:

а) при полном обрыве наливного рукава (-2,d, -2,m)  $G_l \in [6.6, 29.2]$  кг/с;

б) из отверстия (10% диаметра) (-2,e, -2,l)  $G_l \in [0.066, 0.29]$  кг/с.

*Варианты '-2,i', '-2,j'* ГС аварии (истечение паровой фазы СУГ из рукава). Массовую скорость паровой струи в приближении постоянства ее величины и  $Zz = 1$  оценим по соотношению (2.12):

а) при полном обрыве рукава паровой фазы ('-2,j')  $G_v \in [0.26, 2.4]$  кг/с;

б) отверстия (10% диаметра) (-2,i)  $G_l \in [0.0026, 0.024]$  кг/с.

*Вариант -2,g* ГС отличается от варианта -2,c тем, что пролив будет неограниченным, его площадь превысит площадь АГЗС.

*Вариант -2,o* ГС, пролив также неограниченный, однако отличие от варианта -2,g заключается в меньшей площади пролива,  $S_{\text{пр}} \in [0, 12.1]$  м<sup>2</sup>. Интервальная оболочка бруса скорости испарения из пролива: удельная массовая скорость  $w_{\text{СУГ}} \in [0, 0.042]$  кг/м<sup>2</sup>·с, массовая скорость испарения  $W_{\text{СУГ}} \in [0, 4.4]$  кг/с.

Сведем полученные оценки параметров вариантов ГС аварии в таблицу 3.26, в которой представим только те варианты ГС, оцененная вероятность которых превышает  $10^{-8}$  год.

Таблица 3.26 – *Параметры вариантов головного события аварии на территории автомобильной газозаправочной станции*

Вариант ГС /параметр	-2,a	-2,b	-2,c	-2,l	-2,m	-2,o
Вероятность Р, год <sup>-1</sup>	$5 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$[1.3, 5.4] \cdot 10^{-6}$	$[1.4, 5.5] \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Массовый расход, кг/с	[0.45, 4.1]	[2.1, 16.9]	–	[0.066, 0.29]	[6.6, 29.2]	–
Масса облака ТВС, кг	–	–	[143, 6595]	–	–	[0, 24]

### 3.5.2 Оценка целевых метрик сценариев аварии на территории ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция"

Переходим к оценке событий правой части ДГБ – величине поражающих факторов аварии. Принимаем, что формирование пролива ПБА и его последующее возгорание возможны только при вариантах '-2,c', '-2,o' ГС (квазигнновенном разрушении оболочки резервуара), поскольку при ударе струи СУГ о подстилающую поверхность образующиеся капли СУГ будут испаряться в атмосфере.

*Сценарий "Пожар пролива"*. Из шести рассматриваемых вариантах ГС пролив СУГ может быть сформирован в единственном из них, -2,c. Целевая метрика сценария – интенсивность падающего на условную объект-мишень (100 м от факела) теплового потока.

Оценку величины целевой метрики выполним по формулам [61].

Таблица 3.27 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Пожар пролива" для единственного варианта головного события аварии на территории АГЗС*

Вариант ГС /параметр	-2,c
Интенсивность теплового потока I, кВт/м <sup>2</sup>	[0, 20.5]
Условная вероятность	[0, 0.29]

*Сценарий "Струевое пламя" (факельное горение)*. Целевая метрика – та же, что в предыдущем сценарии, ее оценку выполним по формулам (2.29) – (2.41), (2.72) и (2.73).

Таблица 3.28 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Факельное горение струи" для вариантов головного события аварии на территории АГЗС*

Вариант ГС /параметр	-2,a	-2,b	-2,l	-2,m
Интенсивность теплового потока I, кВт/м <sup>2</sup>	[14.1, 14.6]	[14.4, 15.6]	[14.9, 16.2]	[14.0, 14.1]
Длина факела L <sub>F</sub> , м	[10.5, 26.4]	[22.1, 46.3]	[5.0, 9.1]	[31.9, 57.8]
Условная вероятность	[0.0114, 0.057]	[0.0114, 0.057]	[0.0114, 0.057]	[0.0114, 0.057]

Сценарий "Пожар-вспышка". Оценку поражающих факторов выполним по формулам (2.86) и (2.87). Целевая метрика – радиус области, занятой пожаром-вспышкой. В ситуации с проливом СУГ определение массы паров в ТВС является непростой задачей. Учтем, что корреляция для оценки интенсивности испарения СУГ из пролива, рекомендуемая нормативной методикой МЧС РФ [61], справедлива после 10 с после начала формирования пролива. Первые 10 с являются периодом бурного испарения растекающейся жидкой фазы, за это время в пар превратится доля  $\delta$  массы жидкой фазы, имеющейся на момент аварии в резервуаре.

Вариант ГС -2,с. Совокупная масса паров СУГ в ТВС  $m_{\text{п}}(t)$  для  $t > 10$  с:

$$m_{\text{п}}(t) = m_{\text{п1}} + m_{\text{п2}} + m_{\text{п3}}(t), \quad (3.36)$$

где  $m_{\text{п1}}$  – масса первичного пара, кг;

$m_{\text{п2}}$  – масса вторичного пара, испарившегося за первые 10 с, кг;

$m_{\text{п3}}(t)$  – масса вторичного пара, испарившегося после 10 секунд, кг.

Значения параметров  $m_{\text{п1}}$  и  $m_{\text{п2}}$  уже были оценены нами ранее, оба они являются 46-ти компонентными брусами с интервальными оболочками:  $m_{\text{п1}} \in [142.7, 3338]$  кг,  $m_{\text{п2}} \in [0, 3256]$  кг. Анализ правой части (2.49) показывает, что величина второго слагаемого в скобках в условиях рассматриваемой задачи составляет примерно 1% от величины первого слагаемого, поэтому без существенной потери точности пренебрежем им. После интегрирования очевидно, что после 10 секунд  $m_{\text{п3}}$  увеличивается как корень квадратный из  $t$ :

$$m_{\text{п3}}(t) = \frac{2 \cdot (T_{\text{в}} - T_{\text{б}})}{L_{\text{б}}} \cdot \left( \frac{\lambda_{\text{с}} \cdot C_{\text{с}} \cdot \rho_{\text{с}}}{\pi} \right)^{0.5} \cdot \tau^{0.5} \Big|_{10}^t, \quad (3.37)$$

Известно, что после начального периода бурного кипения пролива СУГ (примерно 10 с) подстилающая поверхность "захлаживается", а интенсивность испарения резко уменьшается. Оценка массы  $m_{\text{п3}}(600)$  СУГ, испарившегося за период 10 – 600 с, по (3.37) дало значение  $m_{\text{п3}}(600) \in [1.4, 5.6]$  кг, показывающее, что  $m_{\text{п3}} \ll m_{\text{п1}}, m_{\text{п2}}$ , поэтому в качестве массы паров СУГ в ТВС принимаем  $m_{\text{п}} \approx m_{\text{п1}} + m_{\text{п2}}$ .

С целью минимизации вычислительной неопределенности суммирование выполним в аффинной постановке, получена интервальная оболочка:  $m_{\text{п}} \in [142.7, 6595]$  кг. Итогом расчетов является интервальная оболочка радиуса зоны поражения при пожаре-вспышке  $R_{\text{Ф}} \in [31.9, 121]$  м.

Вариант ГС -2,о. Принимаем, что весь СУГ из баллона создаст первичное облако, таким образом  $m_{\text{п}} \in [0, 24]$  кг, интервальная оболочка радиуса зоны поражения при пожаре-вспышке  $R_{\text{Ф}} \in [0, 18.6]$  м.

Таблица 3.29 – **Целевая метрика и условная вероятность сценария "Пожар-вспышка" для вариантов головного события аварии на территории АГЗС**

Вариант ГС /параметр	-2,с	-2,о
Радиус зоны поражения $R_F$ , м	[31.9, 121]	[0, 18.6]
Условная вероятность	[0.034, 0.17]	[0.034, 0.17]

Сценарий "Объемный взрыв облака ТВС". Оценку целевых метрик сценария выполним по расчетным соотношениям (2.75) – (2.82) второй главы диссертации. Расчет величины стехиометрической концентрации ПБА по формуле (3.21) дал величину  $C_{стх} = 4.46$  об.%. Учитывая, что в рассматриваемом температурном диапазоне СУГ кипит, объемные концентрации паров СУГ в пределах облака ТВС велики, поэтому для оценки энергетического потенциала объемного взрыва воспользуемся вторым соотношением (П3.36) [61]. Согласно экспертной таблице П3.3 [61] класс взрывного превращения – четвертый.

Вариант ГС -2,с. Интервальная оболочка на расстоянии 100 м от эпицентра взрыва: а) безразмерного избыточного давления взрыва  $P_x \in [0.072, 0.45]$ ; б) безразмерного импульса  $I_x \in [0.015, 0.067]$ ; в) размерного избыточного давления  $\Delta P \in [7.3, 45.2]$  кПа; г) размерного импульса  $I^+ \in [300, 4600]$  Па·с.

Вариант ГС -2,о. Интервальная оболочка целевых метрик сценария на расстоянии 100 м от эпицентра взрыва: а) безразмерного избыточного давления взрыва  $P_x \in [0, 0.1]$ ; б) безразмерного импульса  $I_x \in [0, 0.01]$ ; в) размерного избыточного давления  $\Delta P \in [0, 10.3]$  кПа; г) размерного импульса  $I^+ \in [0, 114]$  Па·с.

Таблица 3.30 – **Целевые метрики и условная вероятность сценария "Объемный взрыв облака ТВС" для вариантов головного события аварии на территории АГЗС**

Вариант ГС /параметр	-2,с	-2,о
Избыточное давление $\Delta P$ , кПа	[7.3, 45.2]	[0, 10.3]
Импульс положительной фазы $I^+$ , Па·с	[300, 4600]	[0, 114]
Условная вероятность	[0.0024, 0.012]	[0.0024, 0.012]

Сценарий "Взрыв типа BLEVE". Данный сценарий реализуется при эскалации аварии по механизму "домино", когда резервуар с СУГ во время операции его пополнения из другого сосуда оказывается рядом (или внутри) очага пожара соседнего резервуара. Вследствие обогрева резервуара тепловым потоком пожара пролива возможно его разрушение из-за роста давления в паровом пространстве.

Данный сценарий аварии может быть реализован в единственном варианте ГС -2,с.

Согласно разделу V Приложения 3 [61] целевые метрики взрыва могут быть оценены по модели ТНТ-эквивалента.

$$\Delta P = P_0 \cdot \left( 0.8 \cdot \frac{m_{np}^{0.33}}{x} + 3 \cdot \frac{m_{np}^{0.66}}{x^2} + 5 \cdot \frac{m_{np}}{x^3} \right); \quad (3.38)$$

$$\Gamma^+ = 123 \cdot \frac{m_{np}^{0.66}}{x}; \quad (3.39)$$

где

$$m_{np} = \left( \frac{E_{eff}}{4.52} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (3.40)$$

Результаты расчета – 46-ти компонентные брусы параметров взрыва на расстоянии 100 м от эпицентра взрыва, с интервальными оболочками: а) тротилового эквивалента  $m_{np} \in [0.065, 3.0] 10^5$  кг; б) избыточного давления  $\Delta P \in [28.9, 341]$  кПа; в) размерного импульса  $\Gamma^+ \in [430, 5500]$  Па·с. Скорость разлета осколков оболочки резервуара массой по (2.65) – (2.66) является 46-ти компонентным брусом с интервальной оболочкой  $|\overline{V_{оск}}| \in [53, 284]$  м/с.

Таблица 3.31 – *Целевые метрики и условная вероятность сценария "Взрыв типа BLEVE" для единственного варианта головного события аварии на территории АГЭС*

Вариант ГС /параметр	-2,с
Избыточное давление $\Delta P$ , кПа	[29, 341]
Импульс положительной фазы $\Gamma^+$ , Па·с	[430, 5500]
Средняя скорость разлета осколков оболочки $V_{оск}$ , м/с	[53, 284]
Условная вероятность	[0, 0.21]

*Сценарий "Огненный шар"*. Переобогащенное парокапельное облако СУГ, образующееся в результате взрыва, будет сгорать в режиме огненного шара. Целевые метрики сценария оценим по формулам (2.68) – (2.71), их интервальные оболочки: времени существования ОШ  $t_{ош} \in [0, 9.6]$  с, интенсивности падающего на объект-мишень теплового потока  $I \in [0, 51.4]$  кВт/м<sup>2</sup>.

Таблица 3.32 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Огненный шар" для единственного варианта головного события аварии на территории АГЭС*

Вариант ГС/параметр	-2,с
Интенсивность теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup>	[0, 51.4]
Время жизни ОШ $t_{ош}$ , с	[0, 9.4]
Условная вероятность	[0, 0.21]

### **3.6 Оценка параметров аварии на ВПОО "Технологический блок" газораспределительной станции**

Выполним интервальную оценку целевых метрик сценариев аварии в технологическом блоке газораспределительной станции (ГРС) – взрывопожароопасном объекте, в котором обращается компримированный природный газ.

ГРС предназначена для редуцирования (снижения давления) природного газа высокого давления, подаваемого по газопроводам – отводам от магистрального газопровода, поддержания давления в выходном трубопроводе в заданном диапазоне (независимо от отбора потребителем и колебания давления на выходе), а также для очистки, одоризации и коммерческого учета расхода газа перед подачей потребителю.

На территории площадки условной ГРС расположены следующие составляющие данного ВПОО: блок подогрева газа, технологический блок, блок одоризации природного газа. Подогрев магистрального природного газа с целью предотвращения гидратообразования при редуцировании газа осуществляется в блоке подогрева, в кожухотрубном подогревателе ПГ-10. Одоризация природного газа смесью природных меркаптанов необходима для придания природному газу специфического запаха перед его подачей населению.

Выполним интервальную КОР технологического блока рассматриваемой нами ГРС. ДГБ аварии на рассматриваемом ВПОО представлена на рисунке 3.8.

Технологический блок представляет собой модульное здание размерами в плане 16×8 м и высотой 6 м, внутри которого расположено следующее технологическое оборудование: входной и выходной управляемые краны; узел очистки газа от капельной фазы и механических примесей ФХ-02; узел замера расхода газа с диафрагмой "Суперфлю"; блок редуцирования, состоящий из трех последовательно расположенных регуляторов РДУ 80-01; соединительные трубопроводы из труб усиленной серии диаметром 150 мм общей эквивалентной длиной 154 м (с учетом фланцевых соединений эквивалентной длиной 10 м каждое).

Природный газ поступает на ГРС под давлением 7.5 МПа, передается потребителю под давлением 1.2 МПа.

#### **3.6.1 Оценка параметров головного события аварии**

Начнем с оценки параметрической неопределенности.

Природно-эксплуатационная группа параметров представлена:

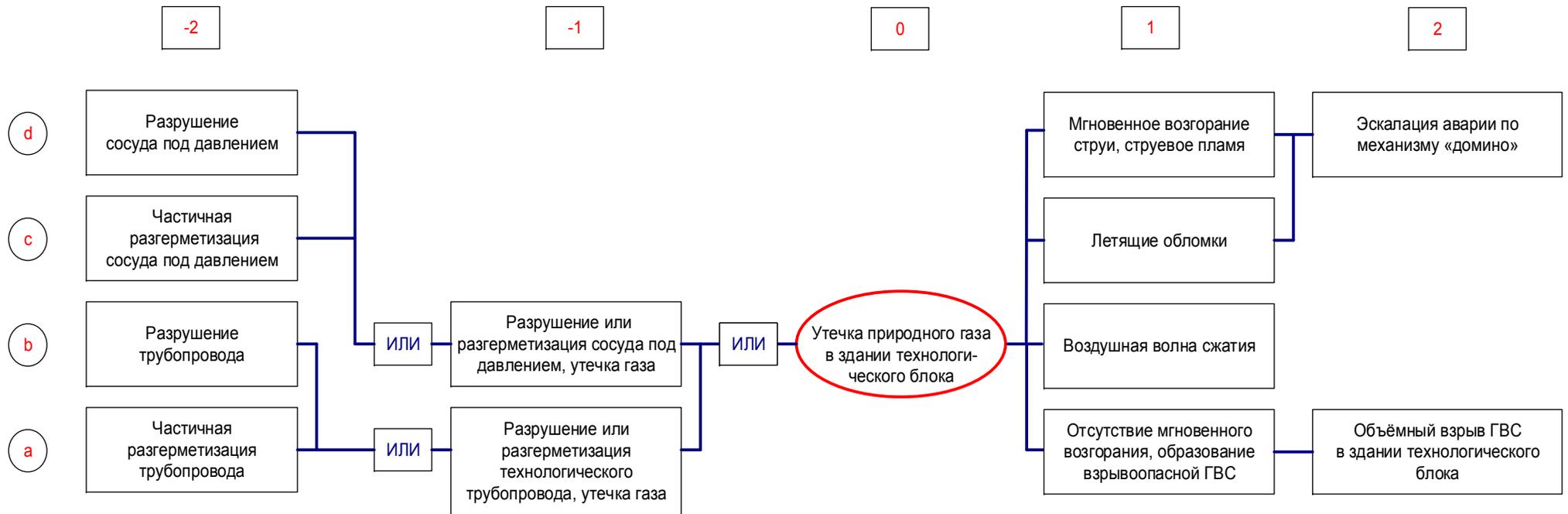


Рисунок 3.8 – ДГБ аварии в технологическом блоке ГРС

- температурой газа  $T_1$ , с учетом специфики рассматриваемого ВПОО принимаем  $T_1 \in [273, 283] \cdot K$ ;
- давлением газа (абсолютное значение, с высокой стороны)  $P_1$  в трубопроводах и сосудах, работающих под давлением (фильтрах, кранах, счетчике газа). В качестве  $P_1$  принимаем интервал  $P_1 \in [7.4, 7.6]$  МПа;
- плотностью газа в нормальных условиях  $\rho_0 \in [0.68, 0.73]$  кг/м<sup>3</sup>;
- плотность стали трубы  $\rho_{ст} \in [7800, 7900]$  кг/м<sup>3</sup>;
- удельной теплоемкостью природного газа при постоянном объеме  $c_v$ , Дж/кг·К. Справочник [110] сообщает следующие точечные значения удельной изобарной теплоемкости: а) метана – при температуре 300 К и давлении 1 МПа  $c_p = 2.29$  Дж/кг·К, при давлении 10 МПа

$c_p = 3.02$  Дж/кг·К; б) этана – при температуре 300 К и давлении 1 МПа  $c_p = 1.91$  Дж/кг·К, при давлении 10 МПа  $c_p = 3.46$  Дж/кг·К. Используя метод линейной интерполяции, величину показателя Пуассона  $\gamma_g$ , принятый состав природного газа (ниже), получаем оценку  $c_v$  природного газа при давлении  $P_1$   $c_v \in [2.15, 2.16]$  Дж/кг·К;

- длиной разрушаемого отрезка трубопровода  $L_{oc} \in [5, 10]$  м.

В группе модельных параметров:

- кинематическая вязкость газа  $\nu$ . В приближении идеального газа (до давлений  $\sim n \cdot 10$  МПа) вязкость газов от давления почти не зависит, [110]. В температурном диапазоне 200 – 300 К в качестве кинематической вязкости природного газа принимаем  $\nu \in [7.8, 11.2] 10^{-6}$  Па·с, [110];

- коэффициент  $K_t \in [0.5, 0.632]$ , [109].

Ряд параметров задачи представлен вырожденными интервалами:

- универсальная газовая постоянная  $\hat{R} = 8314$  Дж/кмоль;
- молярная масса природного газа  $\mu$ . Приняв следующий состав газа: метан 97.2%, этан 2.8%, получаем оценку  $\mu = 16.4$  кг/кмоль;

- удельная газовая постоянная природного газа  $R$ . С учетом принятого нами значения его молярной массы  $R = \hat{R} / 16.4 = 506.95$  Дж/кг;

- показатель адиабаты природного газа (по метану)  $\gamma_g = 1.31$ ;

- стехиометрическая концентрация природного газа (по метану) в смеси с воздухом  $C_{стx} = 9.4$  об. %;

- параметры трубы усиленной серии: внутренний диаметр  $d_{тр} = 154$  мм, толщина стенки  $\delta_{тр} = 0.0055$  м; наружный диаметр  $d_{тrn} = 165$  мм;

- величина шероховатости труб  $\Delta d = 10^{-4}$  м;

- объемы сосудов под давлением  $V_{сос}$ , м<sup>3</sup>, расположенных в помещении технологического блока ГРС, различаются. Из консервативных соображений несколько условно припишем сосудам объем  $V_{сос} = 0,5$  м<sup>3</sup>. Приняв, что сосуды имеют форму цилиндра с отношением высоты к диаметру 2:1 при толщине стенки 60 мм получаем оценку массы их оболочки  $m_{об.сос} \in [940, 950]$  кг;

- свободный объем помещения технологического блока  $V_{св} = 760$  м<sup>3</sup>;

- коэффициент истечения газа из аварийного отверстия  $\sigma = 0.8$ ;

- коэффициент участия газа во взрыве  $Z$  согласно таблице А.1 ГОСТ Р 12.3.047-2012 [23]  $Z = 0.5$ ;

- число обломков оборудования  $n_{оск} = 2$ ;

- коэффициент длины пламени факела  $K_f = 15$ ;

- коэффициент негерметичности помещений  $K_H = 3$ .

Переходим к оценке величины параметров ГС. Как показано на рисунке 3.8, возможны четыре варианта ГС (события  $-2,d$ ;  $-2,c$ ;  $-2,b$ ;  $-2,a$ ). Их вероятности могут быть оценены с учетом полученных во второй главе диссертации значений.

Таблица 3.33 – *Вероятности вариантов головного события аварии в технологическом блоке ГРС*

Вариант ГС /параметр	-2,d	-2,c	-2,b	-2,a
Вероятность P, год <sup>-1</sup>	$[1, 2] \cdot 10^{-5}$	$[1, 2] \cdot 10^{-4}$	$[0.077, 0.46] \cdot 10^{-4}$	$[0.31, 0.46] \cdot 10^{-4}$

Выполним численные оценки параметров, характеризующих масштаб ГС, по расчетным соотношениям (2.11) – (2.20) второй главы диссертации. При принятых значениях параметров: поправка  $\Delta \in [0.57, 0.61]$ .

Оценим величину "гидравлического" критического давления природного газа:

$$P_{кр} = P_a \cdot \left( \frac{\gamma_r + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma_r}{\gamma_r - 1}}. \quad (3.41)$$

Расчет дает значение  $P_{кр} = 186$  кПа, коэффициент сжимаемости газа в термодинамическом состоянии газа  $P_1, T_1$  по (2.13):  $Z_{z1} \in [0.81, 0.86]$ . Анализ расчетного соотношения (2.13) показывает, что его входные параметры связаны (через плотность газа), поэтому аффинное представление температуры и давления газа, а затем и плотности, позволяет улучшить оценку коэффициента сжимаемости  $Z_{z1a} \in [0.81, 0.84]$ .

Температура газа  $T_{кр}$  при критическом давлении может быть найдена по уравнению адиабаты

$$T_{кр} = T_1 \cdot \left( \frac{P_1}{P_{кр}} \right)^{\frac{1-\gamma_r}{\gamma_r}} \quad (3.42)$$

$T_{кр} \in [113.4, 121.7]$  К. Соответственно, коэффициент сжимаемости газа в состоянии  $P_{кр}, T_{кр}$   $Z_{z_{кр}} \in [0.968, 0.970]$ . Расчеты в рамках аффинно-интервальной арифметики дают слегка суженный интервал  $Z_{z_{кра}} \in [0.968, 0.969]$ . Далее все расчеты будут выполняться в аффинном представлении параметров.

Согласно СТО Газпром 2-3.5.051-2006 [108] скорость течения газа  $u_{шт}$  в штатном режиме эксплуатации газопровода не должна превышать 20 м/с. Оценим величину  $u_0$  по (2.20),  $u_0 \in [143.2, 145.7]$  м/с. Следовательно,  $\Delta u \in [1.43, 1.46]$  м/с. Таким образом, для оценки числа Рейнольдса  $Re$  потока газа в трубе можно принять  $u_{тр} \approx 20$  м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления гидравлически гладких труб может быть оценен по универсальной формуле (3.43), предложенной ВНИИГАЗ'ом

$$\lambda_{\text{тр}} = 0.067 \cdot \left( \frac{\Delta d}{d_{\text{тр}}} + \frac{158}{\text{Re}} \right)^{0.2}. \quad (3.43)$$

С учетом принятой нами ранее величины кинематической вязкости газа получаем оценку числа Рейнольдса  $\text{Re} \in [2.7, 3.9] \cdot 10^5$ , а затем и  $\lambda_{\text{тр}} \in [0.0187, 0.019]$ .

Скорость звука в газе в трубе до разрыва по (2.18)  $u_{\text{зв}} \in [382.8, 396.9]$  м/с.

Постоянная времени  $\varepsilon \in [1.30, 1.36]$  с.

Масса газа, способного вытечь из отрезка трубопровода  $M_0 \in [167.4, 184.9]$  кг.

Начнем с оценок для малого отверстия (10% диаметра трубы, или 15 мм):

а) начальный (в момент разрыва) массовый расход газа  $G_0 \in [2.35, 2.45]$  кг/с;

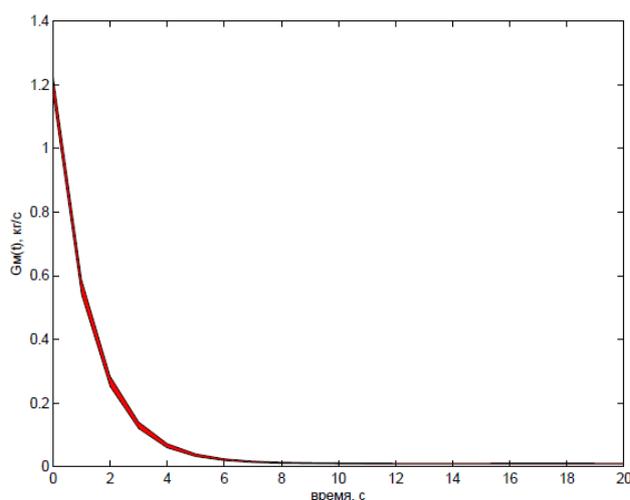
б) коэффициент сохранения массы  $\eta_m \in [104.0, 116.6]$ .

Зависимость массового расхода газа  $G_{\text{выб}}(t)$  из аварийного отверстия может быть оценена по уравнению (2.11). Интегрирование уравнения (2.11) по времени позволяет получить оценку массы газа  $M(t)$ , вытекшего за время  $0 - t$  из аварийного отверстия:

$$M(t) = \int_0^t G(\tau) d\tau = \frac{M_0}{1 + \eta_m} \cdot \left\{ \eta_m \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_m^2 \cdot \varepsilon}\right) \right] + \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\varepsilon}\right) \right] \right\}. \quad (3.44)$$

Результаты расчета величины массового расхода  $G(t)$  для малого и большого (гильотиновый обрыв трубы) отверстий графически представлены на рисунке 3.9.

а) малое отверстие (10% диаметра)



б) большое отверстие (на полное сечение)

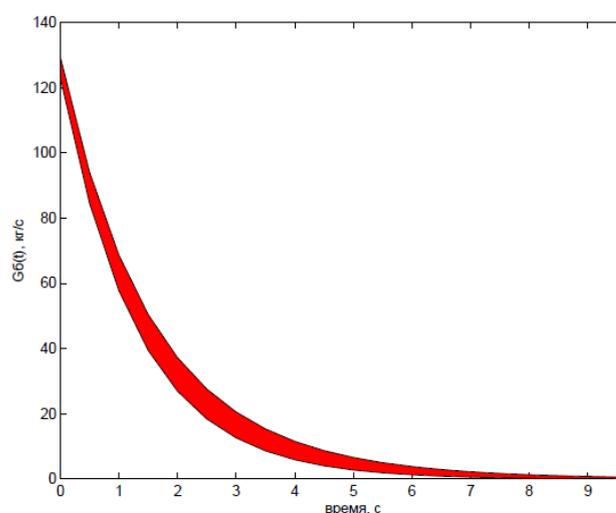


Рисунок 3.9 – Временная зависимость массового расхода газа  $G(t)$  из отверстия

Согласно расчету из малого отверстия газ будет выходить медленно:

Таблица 3.34 – **Временная зависимость массы газа, вышедшего из малого отверстия в отрезке трубопровода (вариант ГС -2,а)**

Время, с	10000	20000	30000	40000	50000
Масса газа M(t), кг	[74.4, 90.3]	[115.6, 135.8]	[137.5, 160.0]	[149.9, 172.7]	[156.8, 179.4]
То же в долях M <sub>0</sub>	[0.41, 0.53]	[0.65, 0.78]	[0.79, 0.91]	[0.87, 0.96]	[0.92, 0.99]

Масса газа, вытекшего за 1000 с, M(1000) ∈ [10.6, 13.6] кг.

В случае обрыва трубы на полное сечение численные оценки изменятся:

а) изменение скорости течения газа  $\Delta u = u_0$ , поэтому изменится число Рейнольдса  $Re \in [2.2, 3.3] \cdot 10^6$  и коэффициент гидравлического трения  $\lambda_{тр} \in [0.018, 0.0181]$ ;

б) постоянная времени  $\varepsilon \in [1.27, 1.32]$  с;

в) начальный (в момент разрыва) массовый расход газа  $G_0 \in [234, 245]$  кг/с;

г) коэффициент сохранения массы  $\eta_m \in [1.07, 1.19]$ .

В данном случае согласно расчету уже примерно через восемь секунд газ из отсеченного отрезка трубопровода вытечет почти полностью,  $M(8) \approx M_0$ .

Таблица 3.35 – **Временная зависимость массы газа, вышедшего из трубопровода при гильотинном обрыве (вариант ГС -2,б)**

Время, с	1	2	5	7	8
Масса газа M(t), кг	[83.1, 90.2]	[124.4, 136.2]	[160.6, 178.5]	[164.8, 183.6]	[165.5, 184.6]
То же в долях M <sub>0</sub>	[0.47, 0.51]	[0.71, 0.76]	[0.95, 0.98]	[0.98, 1.00]	[0.99, 1.00]

Повторим оценки масштаба аварии в технологическом блоке для вариантов головного события, соответствующих разгерметизации любого из сосудов под давлением. При квазимгновенном разрушении оболочки сосуда вся масса  $m_{г.сос}$  содержащегося в сосуде сжатого природного газа выбрасывается в помещение технологического блока. С учетом объема сосуда, плотности сжатого природного газа и коэффициента его сжимаемости  $Zz_1$  масса газа в сосуде  $m_{г.сос} \in [30.7, 34.0]$  кг.

В случае образования в стенке сосуда "малого" отверстия начнется нестационарное (с учетом ограниченности объема сосуда) истечение газа, массовая скорость которого сначала (пока избыточное давление в сосуде будет превышать  $P_{кр}$ ) будет соответствовать режиму сверхкритического истечения:

$$G(t) = -\frac{dm(t)}{dt} = \frac{\pi \cdot d_{отв}^2 \cdot \sigma}{4} \cdot \sqrt{P \cdot \frac{m}{V_{сос}} \cdot \gamma_r \cdot \left(\frac{2}{\gamma_r + 1}\right)^{\frac{\gamma_r + 1}{\gamma_r - 1}}} \quad (3.45)$$

а затем – докритического истечения:

$$G(t) = -\frac{dm(t)}{dt} = \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}}^2 \cdot \sigma}{4} \cdot \left[ P \cdot \frac{m}{V_{\text{сос}}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \gamma_r}{\gamma_r - 1} \right) \cdot \left( \frac{P_0}{P} \right)^{2/\gamma_r} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{(\gamma_r - 1)/\gamma_r} \right\} \right]^{1/2} \quad (3.46)$$

Найдем зависимость массы газа в сосуде от времени (в упрощенной постановке  $Zz = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ ) как решение балансового уравнения:

$$m(t + dt) = m(t) - G(t) \cdot dt, \quad (3.47)$$

которое будем решать в конечных разностях. С использованием аффинного представления, при  $\Delta t = 0.02$  с, нами получено значение массы газа в сосуде:  $m(5) \in [3.7, 24.3]$  кг – после пяти секунд истечения. Метод глобальной оптимизации дал существенно лучшие результаты:  $m(5) \in [10.8, 23.9]$  кг и  $m(20) \in [0.79, 15.9]$  кг.

Результаты расчетов расхода и массы газа отражены в таблицах 3.36 – 3.38.

### 3.6.2 Оценка целевых метрик сценариев аварии на ВПОО "Технологический блок" газораспределительной станции

Перейдем к оценке параметров событий правой части ДГБ (рисунок 3.8). При образовании аварийных отверстий в стенке трубопровода или сосуда, работающего под давлением, дальнейшее развитие аварии вариативно – если воспламенение происходит сразу после разгерметизации, образуются струевые пламена, если источник зажигания появляется с некоторой задержкой – возможен объемный взрыв образовавшейся газовой смеси (ГВС).

*Сценарий аварии "Струевое пламя".* Длина факела, формирующегося при горении истекающей из аварийного отверстия струи компримированного природного газа, оценена выше, результаты представлены в таблице 3.38. Заметно, что длина факела быстро уменьшается со временем.

*Сценарий "Объемный взрыв ГВС в замкнутом объеме".* Согласно таблицам 3.36 – 3.38, в период 0 – 1000 с после момента разгерметизации, в воздух помещения технологического блока может вытечь масса природного газа, составляющая для вариантов ГС:  $-2,a - m_r \in [3.29, 12.9]$  кг,  $-2,b - m_r \in [124.4, 184.6]$  кг,  $-2,c - m_r \in [0, 33.0]$  кг,  $-2,d - m_r \in [30.7, 34.0]$  кг. Эти оценки, не учитывающие работу системы аварийной вентиляции, являются чрезвычайно консервативными.

Таблица 3.36 – *Временная зависимость массового расхода газа и длины пламени при факельном горении струи, вытекающей из малого отверстия в стенке трубопровода (вариант ГС -2,а)*

Время, с	200	400	600	800	1000
Массовый расход газа G(t), кг/с	[0.01, 0.011]	[0.0099, 0.011]	[0.0097, 0.011]	[0.0096, 0.0109]	[0.0095, 0.0107]
Длина факела L <sub>F</sub> , м	[2.38, 2.49]	[2.36, 2.48]	[2.35, 2.47]	[2.35, 2.45]	[2.33, 2.44]
Масса вышедшего газа M(t), кг	[3.49, 3.96]	[5.44, 6.25]	[7.37, 8.51]	[9.27, 10.7]	[11.2, 12.9]

Таблица 3.37 – *Временная зависимость массового расхода газа и длины пламени при факельном горении струи, вытекающей при обрыве трубопровода на полное сечение (вариант ГС -2,б)*

Время, с	2	4	6	8
Массовый расход газа G(t), кг/с	[28.2, 32.8]	[6.83, 9.19]	[1.63, 2.71]	[0.39, 0.83]
Длина факела L <sub>F</sub> , м	[57.0, 60.6]	[32.3, 36.4]	[18.2, 22.3]	[10.3, 13.9]
Масса вышедшего газа M(t), кг	[124.4, 136.2]	[155.4, 172.1]	[163.4, 181.9]	[165.5, 184.6]

Таблица 3.38 – *Временная зависимость массового расхода газа и длины пламени при факельном горении струи, вытекающей из малого отверстия в стенке сосуда (вариант ГС -2,с)*

Время, с	1	2	4	6	8	10	13	16	20
Массовый расход газа G(t), кг/с	[0.59, 4.6]	[0.5, 4.5]	[0.35, 4.3]	[0.25, 4.1]	[0.18, 3.8]	[0.12, 3.6]	[0.073, 3.3]	[0.043, 3.1]	[0.022, 2.7]
Длина факела L <sub>F</sub> , м	[12.2, 27.7]	[11.3, 27.4]	[9.8, 26.8]	[8.6, 26.2]	[7.5, 25.6]	[6.5, 25.1]	[5.3, 24.3]	[4.3, 23.5]	[3.2, 22.5]
Масса вышедшего газа M(t), кг	[0, 8.0]	[0, 12.2]	[0.29, 18.6]	[1.91, 23.1]	[3.44, 26.3]	[4.9, 28.5]	[6.93, 30.7]	[8.8, 32.1]	[11.1, 33.0]

Таблица 3.39 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Факельное горение струи" для вариантов головного события аварии в технологическом блоке ГРС*

Вариант ГС /параметр	-2,с	-2,б	-2,а
Длина факела L <sub>F</sub> , м	[3.2, 27.7]	[10.3, 60.6]	[2.33, 2.49]
Условная вероятность	[0.007, 0.035]	[0.007, 0.035]	[0.001, 0.005]

Величина избыточного давления взрыва  $\Delta P$  может быть оценена по формуле (3.30), результат расчета  $\Delta P$  для вариантов ГС: -2,а –  $\Delta P \in [8.9, 34.3]$  кПа; -2,б –  $\Delta P \in [317.7, 488.8]$  кПа; -2,с –  $\Delta P \in [0, 87.3]$  кПа; -2,д –  $\Delta P \in [80.7, 87.3]$  кПа.

Таблица 3.40 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Объемный взрыв в помещении" для вариантов головного события аварии в технологическом блоке ГРС*

Вариант ГС /параметр	-2,d	-2,c	-2,b	-2,a
Избыточное давление $\Delta P$ , кПа	[80.7, 87.3]	[0, 87.3]	[318, 489]	[8.9, 34.3]
Условная вероятность	[0.12, 0.6]	[0.048, 0.24]	[0.048, 0.24]	[0.016, 0.08]

Сценарий "Разрушение трубопровода или сосуда под давлением" сопровождается двумя поражающими факторами – летящими обломками (трубы или оболочки сосуда) и воздушной волной сжатия (ВВС). Руководства по КОР Ростехнадзора рекомендуют оценивать их параметры с помощью расчетных соотношений СТО Газпром 2-2.3-400-2009 [107].

Моделирование разлета осколков при разрушении сосуда под давлением проанализировано нами в разделе 2.5.3. диссертации. При разрушении сосуда начальная скорость разлета осколков  $V_{\text{оск}}$ , м/с, по формуле (Ж.13) [107]:

$$|\vec{V}_{\text{оск}}| = \frac{3 \cdot (P_1 - P_0) \cdot d_{\text{сос}} \cdot K_{\tau}}{2 \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot \delta_{\text{сос}} \cdot u_{\text{зв}}}, \quad (3.48)$$

где  $d_{\text{сос}}$  – наружный диаметр сосуда, м;

$\delta_{\text{сос}}$  – толщина стенки сосуда, м.

В общем случае изменение со временем вертикальной  $w(t)$  и горизонтальной  $u(t)$  проекций вектора скорости осколка  $|\vec{V}_{\text{оск}}|$  может быть найдено как решение системы двух ОДУ:

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = -\chi \cdot \sqrt{w^2 + u^2} \cdot w - g; \\ \frac{du}{dt} = -\chi \cdot \sqrt{w^2 + u^2} \cdot u \end{cases}, \quad (3.49)$$

где  $\chi = \frac{c_x}{2 \cdot L_{\text{ос}}} \cdot \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ст}}} = \frac{0.1 \cdot \rho_{\text{в}}}{L_{\text{ос}} \cdot \rho_{\text{ст}}}$  т.к.  $c_x = 0.2$ .

Траектория полета осколка во многом определяется начальным углом его вылета  $\varphi_0$  к горизонту. Очевидно, что в условиях рассматриваемой задачи (разлет осколков внутри здания) в решении системы уравнений (3.49) нет необходимости, т.к. оценка дальности разлета осколков не имеет смысла.

Задав  $\varphi_0$  интервалом  $\varphi_0 \in [0, \pi/2]$ , получим для осколка массой  $m_{\text{оск}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{сос}} \cdot \delta_{\text{сос}} \cdot L_{\text{ос}} \cdot \rho_{\text{ст}}}{n_{\text{оск}}}$ ,  $m_{\text{оск}} \in [55.6, 112]$  кг значение начальной горизонтальной скоро-

сти полета  $V_{0,оск} \in [61.7, 82.6]$  м/с.

При разрушении сосуда, подставляя в (2.65) – (2.66) известные значения входных параметров, получаем для осколка массой  $m_{оск} \in [470, 475]$  кг оценку модуля скорости разлета фрагментов его оболочки  $|\overline{V}_{оск}| \in [3.5, 3.7]$  м/с.

При разрушении участка трубопровода (ГС -2,b)  $m_{г} = \frac{\pi \cdot d_{тр}^2 \cdot \rho_{1г} \cdot L_{ос}}{4}$ ,  $m_{г} \in [4.8, 10.2]$  кг, тротиловый эквивалент  $m_{тнт.тр} \in [0.0008, 0.0018]$  кг. С учетом геометрических размеров здания технологического блока принимаем  $X \in [1, 16]$  м, для этих расстояний  $\bar{R} \in [676, 1815]$ , модель может быть использована.

Параметры ВВС: а) избыточное давление взрывной волны  $\Delta P \in [0.046, 1.3]$  кПа, б) положительный импульс  $\Gamma^+ \in [0.02, 0.72]$  Па·с.

Аналогично, при разрушении сосуда, работающего под давлением (ГС -2,d),  $m_{г.сос} \in [30.7, 34.0]$  кг, тротиловый эквивалент  $m_{тнт.сос} \in [0.0054, 0.0059]$  кг. С учетом геометрических размеров здания технологического блока принимаем  $X \in [1, 16]$  м, для этих расстояний  $\bar{R} \in [45.5, 967.7]$ , модель может быть использована.

Параметры ВВС: а) избыточное давление взрывной волны  $\Delta P \in [0.087, 2.0]$  кПа, б) положительный импульс  $\Gamma^+ \in [0.072, 1.6]$  Па·с.

Таблица 3.41 – *Целевые метрики и условная вероятность сценария "Разрушение оборудования давлением" для вариантов головного события аварии в технологическом блоке ГРС*

Вариант ГС /параметр	-2,d	-2,b
Избыточное давление ВВС $\Delta P$ , кПа	[0.087, 2.0]	[0.046, 1.3]
Положительный импульс ВВС $\Gamma^+$ , Па·с	[0.072, 1.6]	[0.02, 0.72]
Масса осколка $m_{оск}$ , кг	[470, 475]	[55.6, 112]
Скорость разлета осколков $v_{оск}$ , м/с	[3.5, 3.7]	[61.7, 82.6]
Условная вероятность	1,0	1,0

### 3.7 Выводы по главе 3

1 В данной главе интервальными методами выполнена оценка параметров аварийного риска на территории пяти взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли, на которых обращаются горючие вещества трех типов: 1) легковоспламеняющаяся жидкость; 2) сжиженный углеводородный газ; 3) компримированный природный газ.

2 Показано, что интервальный подход позволяет выполнять необходимые расчеты с учетом наличия параметрической неопределенности. В рамках данного подхода ширина

интервала результата расчета непосредственно характеризует величину его неопределенности

3 Показано, при выполнении интервальных расчетов имеет место эффект так называемого "уширения результатов вычислений", причиной которого является либо неоднократное вхождение любого параметра в расчетное соотношение, либо взаимозависимость входных параметров модели. На многочисленных примерах показано, что с целью минимизации данного негативного эффекта интервальные вычисления следует выполнять с использованием методов Р.Мура, глобальной оптимизации, аффинного представления параметров.

4 В разделе 3.3 диссертации продемонстрировано выполнение качественного анализа и количественной оценки неопределенности, сопутствующей КОР. Кроме того, показано, что в интервальной постановке легко может быть выполнена оценка значимости параметров (параметрическая чувствительность) физико-математических моделей аварийных процессов, применяемых на объектах нефтегазовой отрасли.

5 В том же разделе проанализирован так называемый консервативный подход к КОР. Показано, что традиционный подход, при котором величины всех входных параметров модели задаются скалярными числами, являющихся их наибольшими (или наименьшими – в зависимости от влияния на величину показателя риска) возможными значениями, на самом деле является не вполне "консервативным", поскольку только монотонная целевая функция достигает экстремальных значений на границах своей области определения. В то же время в интервальной постановке все экстремумы целевой функции любого типа гарантированно могут быть найдены методом глобальной оптимизации, что позволяет получить по-настоящему консервативные оценки.

6 Предложен способ улучшения результатов интервальных расчетов в ситуации, когда имеется статистическая информация о поведении величины входных параметров модели внутри диапазонов их изменений.

## **ГЛАВА 4 ИНТЕРВАЛЬНО-МАТРИЧНЫЙ МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ АВАРИЙНОГО РИСКА**

В настоящей главе будет предложен метод количественной оценки аварийного риска объектов нефтегазовой отрасли, позволяющий:

- 1) наиболее полно учесть все возможные (из перечня принятых к учету) варианты возникновения аварии и сценарии ее развития;
- 2) получить монетарную оценку полного ущерба от аварии, включающего его гуманитарную, материальную и экологическую составляющие;
- 3) рассчитать целевую метрику аварийного риска взрывопожароопасного объекта нефтегазовой отрасли, сочетающую оценки как вероятности, так и величины полного ущерба всех вариантов прогнозируемого аварии;
- 4) выполнить количественную оценку неопределенности целевой метрики риска.

### **4.1 Суть интервально-матричного метода КОР**

В рассматриваемом методе решение поставленных задач обеспечивается заданием:

- 1) исчерпывающего перечня рассматриваемых вариантов головного события аварии на объекте нефтегазовой отрасли и сценариев ее развития;
- 2) величины параметров: а) взрывопожароопасного объекта; б) объектов-мишеней, попадающих в область поражающих факторов аварии; в) событий аварийного процесса – интервальными матрицами (брусами);
- 3) полного ущерба от аварии всех вариантов аварии в денежном эквиваленте.

На рассматриваемом ВПОО вводится местная декартова система координат. Описываемый метод предполагает, что объекты-мишени, попадающие в область поражения аварии, относятся к одному из трех типов: 1) люди; 2) имущество; 3) объекты природной среды. Свойства каждого объекта-мишени задаются соответствующим вектором-строкой, столбцы которого характеризуют все необходимые его свойства (пространственные координаты, вероятность нахождения в указанной точке, уязвимость к тому или иному поражающему фактору и т.д.). Учет наличия у объектов-мишеней параметрической неопределенности обеспечивается тем, что каждый вектор-строка является брусом (интервальным вектором).

Основная идея метода заключается в том, что в рамках риск-ориентированного подхода, имея в качестве стратегической цели управление пожарной и/или промышленной безопасностью, наиболее целесообразно в качестве количественной ее меры использовать па-

раметр, являющийся *числом*. Это необходимо для *целей сравнения* (с нормативным значением, или альтернативных проектных решений между собой). В предлагаемом методе в качестве такого числа используется комплексная целевая метрика RR аварийного риска ВПОО, рублей/год, рассчитываемая по соотношению

$$RR = \mathbf{P} \times \mathbf{U} = \sum_{k=1}^K P_k \cdot U_k, \quad (4.1)$$

где  $\mathbf{P}$  – брус вероятностей  $P_k$  реализации вариантов головных событий аварии на рассматриваемом ВПОО, год<sup>-1</sup>;

$\mathbf{U}$  – брус взвешенных величин полного ущерба  $U_k$  (в денежном выражении), причиняемого во всех сценариях аварии на данном взрывопожароопасном объекте при  $k$ -м варианте головного события, рублей;

$k = 1, 2, \dots, K$  – номер варианта головного события.

В свою очередь, величины  $U_k$  рассчитываются по аналогичному соотношению

$$U_k = \sum_{i=1}^I P_{ik} \cdot U_{ik}, \quad (4.2)$$

где  $P_{ik}$  – брус условных вероятностей реализации  $i$ -го сценария аварии при  $k$ -ом варианте головного события;

$U_{ik}$  – брус величин полного ущерба (в денежном выражении), причиняемого объектам-мишеням, расположенным в области поражения, при  $i$ -м сценарии аварии и  $k$ -м варианте ее головного события, рублей;

$i = 1, 2, \dots, I$  – номер сценария развития аварии.

Параметр  $U_{ik}$  является взвешенной суммой принятых к учету видов ущерба, причиняемых всем  $J$  объектам-мишеням, оказавшимся в области поражения при  $i$ -м сценарии реализации аварии и  $k$ -м варианте головного события с учетом условной вероятности причинения ущерба:

$$U_{ik} = \sum_{j=1}^J P_{ikj} \cdot U_{ikj}, \quad (4.3)$$

где  $P_{ikj}$  – брус условных вероятностей причинения  $j$ -му объекту-мишени заданного ущерба соответствующего вида при реализации  $i$ -го сценария аварии и  $k$ -м варианте головного события;

$U_{ikj}$  – брус учитываемого ущерба в денежном выражении, причиняемый  $j$ -му объекту-мишени при реализации  $i$ -го сценария аварии и  $k$ -м варианте ее головного события;

$j = 1, 2, \dots, J$  – номер объекта-мишени.

Условные вероятности  $P_{ikj}$  должны учитывать: а) величину поражающего фактора  $i$ -го сценария аварии в месте расположения  $j$ -го объекта-мишени; б) вероятность нахождения в данном месте (для подвижных объектов-мишеней); в) уязвимость объекта-мишени (условную вероятность поражения), в том числе, с учетом наличия у него защитных средств. В случае статистической независимости этих факторов величины соответствующих условных вероятностей могут быть перемножены.

Операция свертки интервальных матриц по уравнениям (4.1) – (4.3) позволит выразить целевую метрику аварийного риска  $RR$  в виде интервального числа.

При оценке компонентов векторов, характеризующих как вероятность событий, так и величину аварийного ущерба, следует проявлять внимательность, чтобы не допустить дублирования (например, двойного учета ущерба). Последнее может иметь место, например, когда учитывают гибель людей, которые ранее уже были признаны погибшими от поражающих факторов более ранней фазы аварии (то же касается имущества). Кроме того, при расчете эффектов поражения в необходимых случаях следует учитывать сочетанное действие поражающих факторов аварии (например, теплового излучения пожара пролива и факельного горения струи паров), воздействующих одновременно.

Далее выполним интервально-матричное представление всех параметров, используемых в рамках процедуры КОР всех пяти рассматриваемых в диссертации взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли.

## **4.2 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов "**

### **4.2.1 Экономические оценки**

Для выполнения экономических оценок ущерба от аварии принимаем следующие значения: а) стоимость резервуара РГС-75 [5, 6]· $10^5$  рублей; б) стоимость резервуара РВС-200 [6,9, 7,2]· $10^5$  рублей; в) оптовая цена бензина Аи-92 на 2018 год [3,7, 3,8]· $10^4$  руб/м<sup>3</sup>; г) стоимость автобензовоза [2,2, 2,5]· $10^6$  рублей; д) стоимость ж/д цистерны [4,5, 5,6]· $10^6$  рублей; е) величина ССЖ [3, 4]· $10^7$  рублей; ж) восстановительную стоимость здания насосной оценим с помощью Сборников укрупненных показателей восстановительной стоимости (УПВС). Согласно таблице 147 [99] восстановительная стоимость 1 м<sup>3</sup> строительного объема здания насосной для первого тарифного пояса (республика Марий Эл) составляла на 1 января 1972 года 28,0 рублей. Согласно Приложению № 1 к Постановлению Госстроя СССР [76] для пересчета цен 1969 г. к ценам 1984 г. для предприятий хи-

мической промышленности следует использовать коэффициент [1.4, 1.8]. Наконец, для перевода в цены 2018 года воспользуемся письмом Координационного центра по ценообразованию и сметному нормированию в строительстве [71], согласно которому для пересчета стоимости СМР из 1984 года на 2018 год следует использовать региональный коэффициент 182.03 (для республики Марий Эл). Таким образом, восстановительная стоимость  $1 \text{ м}^3$  на 2018 год составляет  $28 \cdot [1.4, 1.8] \cdot 182.03$ , или [7556, 9175] руб/ $\text{м}^3$ . С учетом строительного объема насосной ( $178.2 \text{ м}^3$ ) ее восстановительная стоимость на 2018 год равна  $178.2 \cdot [7556, 9175]$ , или  $[1.3, 1.6] 10^6$  рублей. Оценку денежного эквивалента гуманитарного ущерба выполним согласно [32], [77], экологической составляющей аварийного ущерба – согласно [60], [62], [63], [72], [78].

#### 4.2.2 Параметры объектов-мишеней

*Перечень объектов-мишеней.* Учитывая компактное расположение всех трех ВПОО склада светлых нефтепродуктов (резервуарного парка, насосной, сливо-наливной эстакады), все количественные оценки выполним в данном разделе. На территории зоны поражения прогнозируемого аварии на рассматриваемых ВПОО находятся объекты-мишени всех трех типов:

1) персонал: *obj\_1.1* – рабочие железнодорожной эстакады, два человека; *obj\_1.2* – оператор насосной, один человек; *obj\_1.3* – водитель автоцистерны, один человек; *obj\_1.4* – водитель автоцистерны, два человека; *obj\_1.5* – заправщик автомобильной эстакады, один человек;

2) здания и технологическое оборудование: *obj\_2.1* – железнодорожные цистерны на эстакаде, 2 шт.; *obj\_2.2* – здание насосной; *obj\_2.3* – автобензовоз, 1 шт.; *2.4* – автобензовоз, 2 шт.; *obj\_2.5* – резервуар РГС-75, 4 шт.; *obj\_2.6* – резервуар РВС-200, 1 шт.;

3) объекты природной среды: *obj\_3.1* – атмосферный воздух; *obj\_3.2* – почва.

*Брус объектов-мишеней obj размером 11×8.* Начнем с введения локальной декартовой систем координат ВПОО. Ее начало совместим в левым нижним углом здания насосной, ось ОУ направим на север (см. генеральный план склада нефтепродуктов). Первые два столбца бруса объекта-мишени будут задавать его местоположение, первый – координату  $x$ , второй – координату  $y$  (положение объекта будем определять соответствующими декартовыми координатами его точки, ближайшей к центру локальной системы координат).

Остальные компоненты вектора характеризуют:

- третий – условную вероятность нахождения объекта-мишени в заданной точке в момент аварии (для стационарных объектов она тождественно равна 1);

- четвертый – тип внешнего слоя строительного (конструкционного) материала, воспринимающего падающий тепловой поток, и определяющий уязвимость объекта при сценариях аварии с термическим поражением. Каждому материалу присвоим численный идентификатор (таблица 4.1), по которому в соответствующей справочной библиотеке по величине интенсивности падающего теплового потока может быть найдена: а) для людей – вероятность получения ожога заданной степени, либо летального поражения; б) материалов – вероятность воспламенения или деформации;
- пятый – тип объекта, определяющий его уязвимость к воздушной взрывной волне. Присвоенный численный идентификатор (таблица 4.1) позволяет в соответствующей справочной библиотеке по величине избыточного давления и импульса взрыва рассчитать условную вероятность: а) для человека – получения травм или гибели, б) для зданий, сооружений и оборудования – получения повреждений различной степени тяжести;
- шестой – уязвимость к продуктам сгорания ТВС при пожаре-вспышке: для людей при нахождении на открытой местности, или внутри транспортных средств равна 1, внутри зданий равна 0; для зданий, сооружений и оборудования равна 0;
- седьмой: количество объектов данного типа;
- восьмой: а) для людей – величина ССЖ, рублей/чел; б) зданий – восстановительная стоимость, рублей/м<sup>3</sup>; в) резервуаров, автомобилей и т.д. – восстановительная стоимость, рублей.

Таблица 4.1 – *Численные идентификаторы*

Воздействие теплового излучения		Воздействие взрывной волны	
0	воздействие не определено	0	воздействие не определено
1	одежда из хлопчатобумажной ткани	1	человек на открытой местности
2	одежда из брезентовой ткани	2	человек внутри здания
3	рулонная кровля (рубероид, изол)	3	одноэтажное каменное здание
4	каменная кладка	4	стальной резервуар
5	железобетонная плита	5	автоцистерна, ж/д цистерна
6	стальной резервуар	6	автомобиль

Зададим свойства каждого из 11-ти рассматриваемых объектов-мишеней вектор-строками, после чего объединим их в брус ОВJ размером 11×8, таблица 4.2:

Таблица 4.2 – *Брус ОВJ объектов-мишеней аварии на территории ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов"*

Объект	Первый	Второй	Третий	Четвертый	Пятый	Шестой	Седьмой	Восьмой
obj_1.1	-30	[-40.5, 35]	0.1	2	1	1	2	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
obj_1.2	0	0	1.0	0	2	0	1	[3, 4]·10 <sup>7</sup>

Окончание таблицы 4.2

Объект	Первый	Второй	Третий	Четвертый	Пятый	Шестой	Седьмой	Восьмой
obj_1.3	29	101	0.24	1	1	1	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.4	29	[101, 115]	0.05	1	1	1	2	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.5	[12, 31]	[98, 112]	0.24	1	1	1	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_2.1	-32	[-40.5, 35]	0.15	6	5	0	2	$[4.5, 5.6] \cdot 10^6$
obj_2.2	0	0	1.0	4	3	0	1	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
obj_2.3	[12, 31]	101	0.24	6	5	0	1	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
obj_2.4	[12, 31]	[98, 112]	0.05	6	5	0	2	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
obj_2.5	[95, 117.5]	[42.5, 65]	1.0	6	5	0	4	$[5, 6] \cdot 10^5$
obj_2.6	47.5	47.5	1.0	6	5	0	1	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$

### 4.2.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов"

В третьей главе диссертации показано, что перечени возможных сценариев развития аварии для различных вариантов ее головного события, вообще говоря, различаются. Рассматриваемый интервально-матричный метод КОР это обстоятельство учитывает.

*Варианты ГС -2,d; -2,g; -2,h аварии на территории резервуарного парка* отличаются вероятностью и объемом утечки бензина в обвалование. В двух из них (2,d; -2,g) пролив будет неограниченным, в одном (-2,h) – ограниченным. При принятых нами значений глубины пролива 0.05 м и удельной массовой скорости выгорания бензина 0.06 кг/с·м<sup>2</sup> продолжительность выгорания слоя неограниченного пролива невелика,  $t_{\text{выг}} \approx 580$  с, поэтому эскалация аварии по механизму "домино" не прогнозируется.

При варианте ГС -2,h (полное разрушение РВС-200) с учетом наличия ограничивающей стенки эскалация также невозможна. Таким образом, для перечисленных трех вариантов ГС возможны четыре сценария развития аварии – пожар пролива, объемный взрыв ТВС, пожар-вспышка, рассеивание облака ТВС без сгорания.

Для *варианта ГС -2,e* возможных сценариев аварии с учетом их эскалации по механизму домино больше, их семь.

Для каждого варианта ГС, сценария аварии:

а) с учетом расстояний между центром аварии и объектами-мишенями (из бруса ОВJ) рассчитана величина поражающих факторов;

б) с учетом уязвимости объектов-мишеней к поражающим факторам по расчетным соотношениям раздела 2.7 второй главы диссертации оценены условные вероятности причинения всем объектам-мишеням заданного ущерба в натуральном выражении – составляющие бруса  $P_{ijk}$ ;

в) на основании методических подходов, изложенных в разделе 2.8 диссертации, выполнена монетизация всех составляющих полного ущерба аварии, по ее итогам составлен брус  $U_{ijk}$ ;

г) с учетом условных вероятностей: а) нахождения объектов-мишеней в заданной точке; б) нанесения им ущерба поражающими факторами, по совокупности объектов-мишеней для каждого  $k$ -го варианта ГС и  $i$ -го сценария аварии по формуле (4.3) рассчитан взвешенный ущерб  $U_{ik}$ ;

д) с учетом условной вероятности каждого  $i$ -го сценария аварии при  $k$ -м варианте ГС по формуле (4.2) рассчитан взвешенный ущерб  $U_k$ , отвечающий данному варианту ГС.

Полученные оценки отразим в таблицах 4.3 – 4.6. В завершение, с учетом вероятностей вариантов ГС аварии по формуле (4.1) рассчитаем целевую метрику RR аварийного риска ОПО "Резервуарный парк склада светлых нефтепродуктов".

При оценке условной вероятности поражения объектов-мишеней следует избегать методической ошибки "двойного учета" ущерба, как это сделано в расчетном соотношении (3) [93].

Таблица 4.3 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,d аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,d}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[14.1, 14.7]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.0025, 0.0032] [0.75, 0.77] [0.0042, 0.0055]	[6, 8]·10 <sup>7</sup> [3, 8]·10 <sup>6</sup> [3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[18.2, 19.1]	гибель	0	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[14.4, 15.0]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.0025, 0.0039] [0.75, 0.8] [0.0042, 0.0069]	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[14.4, 15.0]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.0025, 0.0039] [0.75, 0.8] [0.0042, 0.0069]	[6, 8]·10 <sup>7</sup> [3, 8]·10 <sup>6</sup> [3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[14.4, 15.0]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.0025, 0.0039] [0.75, 0.8] [0.0042, 0.0069]	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[14.1, 14.6]	возгорание	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[14.3, 15.0]	возгорание	0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[14.4, 15.0]	возгорание	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[14.4, 15.0]	возгорание	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.5	[32.1, 35.6]	возгорание	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.6	[27.6, 28.1]	возгорание	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_3.1		загрязнение	1	[1, 11]
		имущество		уничтожение	1	[0.8, 4.4]·10 <sup>3</sup>

Продолжение таблицы 4.3

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{2,d}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[14.0, 20.3] [0.0001, 0.31]	гибель	0	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.2	[12.6, 17.5] [0.00012, 0.42]	контузия гибель	0 0	[3, 4]·10 <sup>6</sup> [3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[18.8, 20.9] [0.0001, 0.25]	лег. травма тяж. травма	0 0	[2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[18.8, 20.9] [0.0001, 0.25]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1,5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[18.8, 20.9] [0.0001, 0.25]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1,5, 2]·10 <sup>7</sup>
		obj_2.1	[14.0, 20.3] [0.0001, 0.31]	полное разр.	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[12.6, 17.5] [0.00012, 0.42]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6] 10 <sup>6</sup> [6.1, 8.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_2.3	[18.8, 20.9] [0.0001, 0.25]	полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[18.8, 20.9] [0.0001, 0.25]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.5	[33.9, 42.7] [0.00011, 0.46]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.6	[7.9, 10.8] [0.0001, 0.13]	полное разр.	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_3.1		загрязнение	1	[1, 11]
		имущество		уничтожение	1	[0.8, 4.4]·10 <sup>3</sup>

Окончание таблицы 4.3

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,d}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка, радиус зоны поражения <math>R_F</math>, м</i>	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.24, 5.1]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.24, 5.1]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.24, 5.1]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.24, 5.1]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.24, 5.1]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	[1, 11]
		имущество		уничтожение	1	$[0.8, 4.4] \cdot 10^3$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	[1, 11]
		имущество		уничтожение	1	$[0.8, 4.4] \cdot 10^3$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС  $-2,d$  аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-2,d} \in [0.43, 8.9] \cdot 10^6$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,d} \in [4, 8] \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 4.4 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,г аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба U <sub>-2,г</sub>				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[16.1, 17.8]	гибель	[0.0044, 0.0051]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.81, 0.83]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.0052, 0.0063]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[15.7, 16.5]	гибель	0	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[9.2, 10.1]	гибель	[0.0017, 0.0019]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.51, 0.61]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.0042, 0.0069]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[9.2, 12.5]	гибель	[0.0011, 0.0014]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.51, 0.57]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.0042, 0.0063]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[9.2, 12.5]	гибель	[0.0025, 0.0039]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.51, 0.57]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.0042, 0.0063]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[16.1, 17.8]	возгорание	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[15.7, 16.5]	возгорание	0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[9.2, 10.1]	возгорание	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[9.2, 10.1]	возгорание	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
obj_2.5	[9.2, 12.5]	возгорание	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>		
obj_2.6	–	возгорание		[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>		
obj_3.1		загрязнение	1	[7, 14]		
имущество		уничтожение	1	[0.8, 4.4]·10 <sup>3</sup>		

Продолжение таблицы 4.4

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{2,g}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[11.0, 15.8] [0.0001, 0.22]	гибель	0	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.2	[13.6, 18.1] [0.00012, 0.49]	контузия гибель	0 0	[3, 4]·10 <sup>6</sup> [3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[11.4, 13.0] [0.0001, 0.11]	лег. травма тяж. травма	0 0	[2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[11.4, 13.0] [0.0001, 0.11]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[11.4, 13.0] [0.0001, 0.11]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[11.0, 15.8] [0.0001, 0.22]	полное разр.	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[13.6, 18.1] [0.00012, 0.49]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup> [6.1, 8.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_2.3	[11.4, 13.0] [0.0001, 0.11]	полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[11.4, 13.0] [0.0001, 0.11]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.5	[14.4, 16.0] [0.0001, 0.21]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.6	–	полное разр.		[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_3.1		загрязнение	1	[7, 14]
		имущество		уничтожение	1	[0.8, 4.4]·10 <sup>3</sup>

Окончание таблицы 4.4

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,g}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка, радиус зоны поражения <math>R_F</math>, м</i>	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.4, 5.6]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.4, 5.6]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.4, 5.6]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.4, 5.6]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.4, 5.6]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	[7, 14]
		имущество		уничтожение	1	$[0.8, 4.4] \cdot 10^3$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	[7, 14]
		имущество		уничтожение	1	$[0.8, 4.4] \cdot 10^3$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,g аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-2,g} \in [0.34, 4.4] \cdot 10^6$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,g} \in [2, 5] \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 4.5 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,h аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба U <sub>-2,h</sub>				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.04, 0.2]	obj_1.1	[17.7, 19.2]	гибель	[0.0049, 0.0055]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.82, 0.84]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.006, 0.0071]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[35.0, 41.2]	гибель	0	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[5.2, 6.1]	гибель	[0.0008, 0.0011]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.33, 0.4]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.0077, 0.0093]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[5.2, 6.1]	гибель	[0.0008, 0.0011]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.33, 0.4]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.0077, 0.0093]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[9.2, 12.5]	гибель	[0.0027, 0.0037]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.39, 0.44]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.022, 0.029]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[17.7, 19.2]	возгорание	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[35.0, 41.2]	возгорание	0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup>
obj_2.3	[5.2, 6.1]	возгорание	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>		
obj_2.4	[5.2, 6.1]	возгорание	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>		
obj_2.5	[25.2, 30.1]	возгорание	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>		
obj_2.6	–	возгорание				
obj_3.1		загрязнение		1	[5.3, 18.5]·10 <sup>3</sup>	
имущество		уничтожение		1	[3.1, 8.7]·10 <sup>6</sup>	

Продолжение таблицы 4.5

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,h}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,04, 0.2]	obj_1.1	[0.61, 4.3]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.00011, 0.44]	контузия	0	$[3, 4] \cdot 10^6$
				гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.79, 3.0]	лег. травма	0	$[2.7, 3.6] \cdot 10^6$
				тяж. травма	0	$[5.4, 7.2] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[0.00011, 1.7]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
				контузия	0	$[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[0.51, 2.0]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
				контузия	0	$[3, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[0.0001, 0.14]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
				контузия	0	$[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[0.51, 2.0]	полное разр.	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
				полное разр.	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[0.00011, 0.39]	средн. разр.	0	$[6.1, 8.2] \cdot 10^5$
				полное разр.	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[[0.51, 2.0]	полное разр.	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
полное разр.	0			$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$		
obj_2.5	[0.0001, 0.14]	полное разр.	0	$[2,0, 2,4] \cdot 10^6$		
		полное разр.	0	$[2,0, 2,4] \cdot 10^6$		
obj_2.6	[0.45, 1.7]	полное разр.	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$		
obj_3.1	[0.00012, 0.34]	загрязнение	1	$[5.3, 18.5] \cdot 10^3$		
имущество	–	уничтожение	1	$[3.1, 8.7] \cdot 10^6$		

Окончание таблицы 4.5

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,h}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка, радиус зоны поражения <math>R_F</math>, м</i>	[0.04, 0.2]	obj_1.1	[2.2, 21.4]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[2.2, 21.4]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[2.2, 21.4]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[2.2, 21.4]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[2.2, 21.4]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[5.3, 18.5] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[3.1, 8.7] \cdot 10^6$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.08, 0.4]	obj_3.1		загрязнение	1	$[5.3, 18.5] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[3.1, 8.7] \cdot 10^6$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС  $-2,h$  аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-2,h} \in [0.2, 2.9] \cdot 10^6$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,h} \in [1, 2] \cdot 10^{-3}$ .

Таблица 4.6 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,е аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{2,e}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.04, 0.2]	obj_1.1	[28.3, 31.7]	гибель	[0.042, 0.051]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.88, 0.91]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.063, 0.071]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[36.2, 39.4]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[7.8, 9.1]	гибель	[0.0008, 0.0011]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.3, 0.39]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.0011, 0.0015]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[7.8, 9.1]	гибель	[0.0008, 0.0011]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.3, 0.39]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.0011, 0.0015]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[7.8, 9.1]	гибель	[0.0008, 0.0011]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.3, 0.39]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.0011, 0.0015]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[28.3, 31.7]	возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[36.2, 39.4]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[7.8, 9.1]	возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[7.8, 9.1]	возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
obj_2.5	–	возгорание		$[2, 0, 2, 4] \cdot 10^6$		
obj_2.6	[15.2, 19.4]	возгорание	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$		
obj_3.1		загрязнение	1	$[0.06, 6.5] \cdot 10^3$		
имущество		уничтожение	1	$[3.5, 9.7] \cdot 10^6$		

Продолжение таблицы 4.6

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{2,e}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[0.5, 3.8] [0.0001, 0.39]	гибель	0	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.2	[0.68, 2.7] [0.0001, 1.1]	контузия гибель	0 0	[3, 4]·10 <sup>6</sup> [3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[0.44, 3.5] [0.0001, 0.14]	лег. травма тяж. травма	0 0	[2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[0.44, 3.5] [0.0001, 0.14]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[0.44, 3.5] [0.0001, 0.14]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[0.5, 3.8] [0.0001, 0.39]	полное разр.	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[0.68, 2.7] [0.0001, 1.1]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup> [6.1, 8.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_2.3	[0.44, 3.5] [0.0001, 0.14]	полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[0.44, 3.5] [0.0001, 0.14]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.5	[0.4, 1.5] [0.0001, 0.24]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.6	–	полное разр.	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_3.1		загрязнение	1	[0.06, 6.5]·10 <sup>3</sup>
		имущество		уничтожение	1	[3.5, 9.7]·10 <sup>6</sup>

Продолжение таблицы 4.6

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{2,e}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>BLEVE</i> , скорость разлета осколков $u_{оск}$ , м/с	[0,028, 0.14]	obj_1.1	[8.4, 25.3]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[8.4, 25.3]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[8.4, 25.3]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[8.4, 25.3]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[8.4, 25.3]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1		полное разр.	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2		полное разр.	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3		полное разр.	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4		полное разр.	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
		obj_2.5		полное разр.	0	$[2,0, 2,4] \cdot 10^6$
		obj_2.6		полное разр.	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$
		имущество	уничтожение	1	$[3.5, 9.7] \cdot 10^6$	
<i>Пожар-вспышка</i> , радиус зоны поражения $R_F$ , м	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.84, 35.3]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.84, 35.3]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.84, 35.3]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.84, 35.3]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.84, 35.3]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[0.06, 6.5] \cdot 10^3$
				имущество	уничтожение	1
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.08, 0.4]	obj_3.1		загрязнение	1	$[0.06, 6.5] \cdot 10^3$
				имущество	уничтожение	1

Продолжение таблицы 4.6

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного о ущерба $U_{2,e}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Огненный шар,</i> интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup> ; длительность свече- ния $t_{\text{ош}} \in [3.4, 13.4]$ с	[0.028, 0.14]	obj_1.1	[40.1, 51.7]	гибель	[0.98, 1.0]	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[51.2, 62.0]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[24.7, 42.3]	гибель	[0.82, 0.98]	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[24.7, 42.3]	гибель	[0.82, 0.98]	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[24.7, 42.3]	гибель	[0.82, 0.98]	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[40.1, 51.7]	возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[51.2, 62.0]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[24.7, 42.3]	возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[24.7, 42.3]	возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
		obj_2.5	–	возгорание		$[2, 0, 2, 4] \cdot 10^6$
obj_2.6	[31.2, 33.0]	возгорание	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$		
		имущество		уничтожение	1	$[3.5, 9.7] \cdot 10^6$

Окончание таблицы 4.6

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,e}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Факельное горение, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.028, 0.14]	obj_1.1	[19.3, 21.7]	гибель	[0.0056, 0.0063]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.84, 0.86]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.0073, 0.0079]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[22.2, 24.1]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[12.8, 14.1]	гибель	[0.001, 0.0013]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.34, 0.38]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.0017, 0.002]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[12.8, 14.1]	гибель	[0.001, 0.0013]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.34, 0.38]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.0017, 0.002]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[12.8, 14.1]	гибель	[0.001, 0.0013]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.34, 0.38]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.0017, 0.002]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[19.3, 21.7]	возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[22.2, 24.1]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[12.8, 14.1]	возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
obj_2.4	[12.8, 14.1]	возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$		
obj_2.5	[33.5, 34.1]	возгорание		$[2, 0, 2, 4] \cdot 10^6$		
obj_2.6	[16.2, 17.3]	возгорание	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$		
obj_3.1		загрязнение	1	$[0.014, 1.5] \cdot 10^3$		
имущество		уничтожение	1	$[3.5, 9.7] \cdot 10^6$		

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,е аварии на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-2,e} \in [0.49, 3.7] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,e} \in [4, 8] \cdot 10^{-5}$ .

Окончательно, целевая метрика RR аварийного риска на территории резервуарного парка склада светлых нефтепродуктов, рассчитанная по формуле (4.1), составляет:  $RR \in [0.065, 1.8] \cdot 10^4$  рублей/год.

### 4.3 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Насосная светлых нефтепродуктов"

#### 4.3.1 Экономические оценки

Для выполнения экономических оценок ущерба аварии принимаем следующие значения: а) восстановительная стоимость здания насосной  $\cdot [1.3, 1.6] \cdot 10^6$  рублей; б) оптовая цена бензина Аи-92 на 2018 год  $[3,7, 3,8] \cdot 10^4$  руб/м<sup>3</sup>; в) величина ССЖ  $[3, 4] \cdot 10^7$  рублей.

#### 4.3.2 Параметры объектов-мишеней

*Перечень объектов-мишеней:*

- 1) персонал: *obj\_1.2* – оператор насосной, один человек;
  - 2) здания и технологическое оборудование: *obj\_2.2* – здание насосной;
- Брус объектов-мишеней ОВЖ размером 2×8.*

Таблица 4.7 – *Брус ОВЖ объектов-мишеней для аварии в насосной*

Объект	Первый	Второй	Третий	Четвертый	Пятый	Шестой	Седьмой	Восьмой
obj_1.2	0	0	1.0	0	2	0	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_2.2	0	0	1.0	4	3	0	1	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$

#### 4.3.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Насосная светлых нефтепродуктов"

Как показано в третьей главе диссертации единственным сценарием развития аварии, чреватым причинением гуманитарного ущерба, является сценарий "Объемный взрыв паров" в помещении насосной. Ущерб при остальных сценариях ее развития является исключительно имущественным, он заключается в утрате некоторого количества бензина.

Использование вероятностного подхода для оценки вероятности нанесения заданного ущерба объектам-мишеням при аварии на рассматриваемом взрывопожароопасном объекте не представляется возможным, поскольку в формулы: а) (2.112) – (2.128) для прогнозирования поражения людей; б) (2.119) – (2.122) – повреждения зданий входит целевая метрика  $\Gamma^+$  (импульс положительной фазы взрыва), для оценки которой отсутствуют расчетные соотношения. В этой связи оценим указанные вероятности экспертно.

Полученные оценки взвешенного ущерба для всех четырех вариантов ГС покажем в таблицах 4.8 – 4.11. В качестве итога раздела, с учетом вероятностей этих вариантов ГС аварии по формуле (4.1) рассчитаем целевую метрику RR аварийного риска ВПОО "Насосная светлых нефтепродуктов".

Таблица 4.8 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,в аварии в здании насосной светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{2,в}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа</i>	[0,02, 0.1]	obj_1.2	[0.046, 10.9]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
				тяж. травма	0	$[5.4, 7.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[0.046, 10.9]	лег. травма	[0, 0.005]	$[2.7, 3.6] \cdot 10^6$
				полное разр.	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
				средн. разр.	0	$[6.1, 8.2] \cdot 10^5$
		имущество		легкое разр.	[0, 0.1]	$[1.3, 3.6] \cdot 10^5$
уничтожение	1			[5.5, 228]		

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,в аварии в насосной светлых нефтепродуктов, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{2,в} \in [0.001, 5.4] \cdot 10^3$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{2,е} \in [2.1, 3.1] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.9 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,с аварии в здании насосной светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{2,с}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа</i>	[0,02, 0.1]	obj_1.2	[0.26, 10.9]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
				тяж. травма	0	$[5.4, 7.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[0.26, 10.9]	лег. травма	[0, 0.005]	$[2.7, 3.6] \cdot 10^6$
				полное разр.	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
				средн. разр.	0	$[6.1, 8.2] \cdot 10^5$
		имущество		легкое разр.	[0, 0.1]	$[1.3, 3.6] \cdot 10^5$
уничтожение	1			$[5.2, 6.1] \cdot 10^3$		

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,с аварии в насосной светлых нефтепродуктов, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{2,с} \in [0.1, 6.0] \cdot 10^3$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{2,с} \in [0.5, 3.1] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.10 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,d аварии в здании насосной светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,d}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа</i>	[0,02, 0.1]	obj_1.2	[0.046, 10.9]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.2	[0.046, 10.9]	тяж. травма	0	$[5.4, 7.2] \cdot 10^6$
				лег. травма	[0, 0.005]	$[2.7, 3.6] \cdot 10^6$
				полное разр.	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
				средн. разр.	0	$[6.1, 8.2] \cdot 10^5$
		имущество		легкое разр.	[0, 0.1]	$[1.3, 3.6] \cdot 10^5$
		уничтожение	1	$[5.5, 228]$		

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,d с аварии в насосной светлых нефтепродуктов, рассчитанный по соотношению (4.2):  
 $U_{-2,d} \in [0.001, 5.4] \cdot 10^3$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,d} \in [5, 6] \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 4.11 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,e аварии в здании насосной светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,e}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа</i>	[0,02, 0.1]	obj_1.2	[0, 10.9]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.2	[0, 10.9]	тяж. травма	0	$[5.4, 7.2] \cdot 10^6$
				лег. травма	[0, 0.005]	$[2.7, 3.6] \cdot 10^6$
				полное разр.	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
				средн. разр.	0	$[6.1, 8.2] \cdot 10^5$
		имущество		легкое разр.	[0, 0.1]	$[1.3, 3.6] \cdot 10^5$
		уничтожение	1	$[5.2, 6.1] \cdot 10^3$		

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,е с аварии в насосной светлых нефтепродуктов, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{2,e} \in [0.1, 6.0] \cdot 10^3$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{2,e} \in [1, 2] \cdot 10^{-4}$ . Окончательно, целевая метрика RR аварийного риска ВПОО "Насосная светлых нефтепродуктов", рассчитанная по формуле (4.1), составляет:  $RR \in [0.01, 4.8]$  рублей/год.

#### **4.4 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов"**

##### **4.4.1 Экономические оценки**

Стоимость оборудования и материалов, обращающихся на рассматриваемом взрывопожароопасном объекте, подходы к исчислению денежного эквивалента гуманитарного и экологического ущербов принимаем аналогично разделу 4.2.1.

##### **4.4.2 Параметры объектов-мишеней**

Поскольку перечень объектов-мишеней аварии на сливо-наливной эстакаде эквивалентен таковому для аварии на территории резервуарного парка, брус объектов-мишеней также задан таблицей 4.2.

##### **4.4.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов"**

Подобно взрыву (пожару) на территории резервуарного парка перечень возможных сценариев развития аварии на сливо-наливной эстакаде различается для вариантов ее головного события. Варианты ГС -2,б -2,с отличаются лишь вероятностью, величина целевых метрик всех сценариев аварии для них одинакова.

Полученные оценки взвешенного ущерба для всех девяти вариантов ГС аварии сведен в таблицы 4.12 – 4.19. В завершении раздела рассчитаем целевую метрику RR аварийного риска ВПОО "Сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов".

Таблица 4.12 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,в и -3,с аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба U <sub>-3,в;-3,с</sub>				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[36.1, 38.4]	гибель	[0.062, 0.069]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.55, 0.68]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.09, 0.12]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[23.8, 25.6]	гибель	0	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[24.5, 26.6]	гибель	[0.033, 0.038]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[24.5, 26.6]	гибель	[0.033, 0.038]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[24.5, 26.6]	гибель	[0.033, 0.038]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[26.1, 28.4]	возгорание	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[23.8, 25.6]	возгорание	0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[24.5, 26.6]	возгорание	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[24.5, 26.6]	возгорание	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
obj_2.5	[19.7, 23.1]	возгорание	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>		
obj_2.6	[19.7, 23.1]	возгорание	1	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>		
obj_3.1		загрязнение	1	[8.2, 13]		
имущество		уничтожение	1	[3.4, 5.3]·10 <sup>3</sup>		

Продолжение таблицы 4.12

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,b;-3,c}$					
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей	
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $I^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[3.7, 5.2] [0.00015, 0.87]	гибель	0	[6, 8]·10 <sup>7</sup>	
		obj_1.2	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	контузия гибель	0 0	[3, 4]·10 <sup>6</sup> [3, 4]·10 <sup>7</sup>	
		obj_1.3	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	лег. травма тяж. травма	0 0	[2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.4	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.5	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.1	[3.7, 5.2] [0.00015, 0.87]	полное разр.	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.2	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6] 10 <sup>6</sup> [6.1, 8.2]·10 <sup>5</sup>	
		obj_2.3	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.4	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.5	[0.7, 1.9] [0.0001, 0.19]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.6	[0.7, 1.9] [0.0001, 0.19]	полное разр.	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>	
		obj_3.1		имущество	загрязнение уничтожение	1 1	[8.2, 13] [3.4, 5.3]·10 <sup>3</sup>

Окончание таблицы 4.12

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,b;-3,c}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка, радиус зоны поражения <math>R_F</math>, м</i>	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.35, 4.5]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.35, 4.5]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.35, 4.5]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.35, 4.5]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.35, 4.5]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	[8.2, 13]
		имущество		уничтожение	1	$[3.4, 5.3] \cdot 10^3$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	[8.2, 13]
		имущество		уничтожение	1	$[3.4, 5.3] \cdot 10^3$

Итого, взвешенный ущерб вариантов ГС  $-3,b$  и  $-3,c$  аварии на территории сливо-наливной эстакады, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-3,b;-3,c} \in [0.2, 1.8] \cdot 10^7$  рублей, вероятности реализации данных вариантов ГС аварии:  $P_{-3,b} \in [3, 4.5] \cdot 10^{-3}$ ;  $P_{-3,c} \in [1.9, 3.8] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.13 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,d аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,d}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[39.1, 41.2]	гибель	[0.063, 0.066]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.88, 0.94]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.1, 0.11]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[25.1, 26.6]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[27.9, 29.0]	гибель	[0.048, 0.05]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.85, 0.88]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.08, 0.092]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[27.9, 29.0]	гибель	[0.048, 0.05]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.85, 0.88]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.08, 0.092]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[27.9, 29.0]	гибель	[0.048, 0.05]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.85, 0.88]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.08, 0.092]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[39.1, 41.2]	возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[25.1, 26.6]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[27.9, 29.0]	возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[27.9, 29.0]	возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
obj_2.5	[21.2, 23.2]	возгорание	0	$[2, 0, 2, 4] \cdot 10^6$		
obj_2.6	[28.4, 28.9]	возгорание	1			
obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 2.1] \cdot 10^3$		
имущество		уничтожение	1	$[0, 8.4] \cdot 10^5$		

Продолжение таблицы 4.13

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{3,d}$					
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей	
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[3.9, 5.4] [0.00017, 0.95]	гибель	0	[6, 8]·10 <sup>7</sup>	
		obj_1.2	[0.64, 2.6] [0.00012, 1.6]	контузия гибель	0 0	[3, 4]·10 <sup>6</sup> [3, 4]·10 <sup>7</sup>	
		obj_1.3	[0.55, 3.3] [0.00012, 0.2]	лег. травма тяж. травма	0 0	[2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.4	[0.55, 3.3] [0.00012, 0.2]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.5	[0.55, 3.3] [0.00012, 0.2]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.1	[3.9, 5.4] [0.00017, 0.95]	полное разр.	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.2	[0.64, 2.6] [0.00012, 1.6]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup> [6.1, 8.2]·10 <sup>5</sup>	
		obj_2.3	[0.55, 3.3] [0.00012, 0.2]	полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.4	[0.55, 3.3] [0.00012, 0.2]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.5	[0.9, 2.2] [0.00013, 0.23]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.6	[0.47, 1.19] [0.00012, 0.018]	полное разр.	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>	
		obj_3.1		имущество	загрязнение уничтожение	1 1	[0, 2.1]·10 <sup>3</sup> [0, 8.4]·10 <sup>5</sup>

Окончание таблицы 4.13

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,d}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка, радиус зоны поражения <math>R_F</math>, м</i>	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.28, 9.2]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.28, 9.2]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.28, 9.2]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.28, 9.2]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.28, 9.2]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 2.1] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[0, 8.4] \cdot 10^5$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 2.1] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[0, 8.4] \cdot 10^5$

Итого, взвешенный ущерб вариантов ГС  $-3,d$  аварии на территории сливо-наливной эстакады, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-3,d} \in [0.27, 2.2] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии:  $P_{-3,d} \in [1.9, 3.8] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.14 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,е аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,e}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[36.1, 38.4]	гибель	[0.051, 0.053]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.85, 0.86]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.094, 0.096]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[23.8, 25.6]	гибель	0	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[24.5, 26.4]	гибель	[0.033, 0.038]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[24.5, 26.4]	гибель	[0.033, 0.038]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[24.5, 26.4]	гибель	[0.033, 0.038]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[26.1, 28.4]	возгорание	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[23.8, 25.6]	возгорание	0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[24.5, 26.6]	возгорание	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[24.5, 26.6]	возгорание	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
obj_2.5	[19.7, 23.1]	возгорание	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>		
obj_2.6	[27.2, 28.7]	возгорание	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>		
obj_3.1		загрязнение	1	[8.2, 13]		
имущество		уничтожение	1	[3.4, 5.3]·10 <sup>3</sup>		

Продолжение таблицы 4.14

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{3,e}$					
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей	
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[3.7, 5.2] [0.00015, 0.87]	гибель	0	[6, 8]·10 <sup>7</sup>	
		obj_1.2	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	контузия гибель	0 0	[3, 4]·10 <sup>6</sup> [3, 4]·10 <sup>7</sup>	
		obj_1.3	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	лег. травма тяж. травма	0 0	[2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.4	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.5	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.1	[3.7, 5.2] [0.00015, 0.87]	полное разр.	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.2	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup> [6.1, 8.2]·10 <sup>5</sup>	
		obj_2.3	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.4	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.5	[0.7, 1.9] [0.0001, 0.19]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.6	[0.38, 0.92] [0.0001, 0.011]	полное разр.	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>	
		obj_3.1		имущество	загрязнение	1	[8.2, 13]
					уничтожение	1	[3.4, 5.3]·10 <sup>3</sup>

Окончание таблицы 4.14

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,e}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка,</i> радиус зоны поражения $R_F$ , м	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.34, 4.5]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.34, 4.5]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.34, 4.5]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.34, 4.5]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.34, 4.5]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	[8.2, 13]
		имущество		уничтожение	1	$[3.4, 5.3] \cdot 10^3$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	[8.2, 13]
		имущество		уничтожение	1	$[3.4, 5.3] \cdot 10^3$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -3,е аварии на территории сливо-наливной эстакады, рассчитанный по соотношению (4.2):  
 $U_{-3,e} \in [0.12, 1.36] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии:  $P_{-3,e} \in [3, 7] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.15 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,г аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба U <sub>-3,г</sub>				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[0, 13.6]	гибель	[0, 0.002]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0, 0.016]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0, 0.0033]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[0, 16.8]	гибель	0	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[0, 24.5]	гибель	[0, 0.033]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0, 0.38]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0, 0.049]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[0, 24.5]	гибель	[0, 0.033]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0, 0.38]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0, 0.049]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[0, 24.5]	гибель	[0, 0.033]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0, 0.38]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0, 0.049]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[0, 36.1]	возгорание	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[0, 23.8]	возгорание	0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[0, 23.8]	возгорание	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[0, 23.8]	возгорание	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
obj_2.5	[0, 19.7]	возгорание	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>		
obj_2.6	[0, 27.2]	возгорание	0			
obj_3.1		загрязнение	1	[0, 8.4]		
имущество		уничтожение	1	[0, 7.2]·10 <sup>4</sup>		

Продолжение таблицы 4.15

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{3,g}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[0, 3.7]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
			[0, 0.00015]	контузия	0	$[3, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[0, 0.59]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
			[0, 0.0001]	лег. травма	0	$[2.7, 3.6] \cdot 10^6$
				тяж. травма	0	$[5.4, 7.2] \cdot 10^6$
		obj_1.3	[0, 0.47]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
			[0, 0.0001]	контузия	0	$[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[0, 0.47]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
			[0, 0.0001]	контузия	0	$[3, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[0, 0.47]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
			[0, 0.0001]	контузия	0	$[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[0, 3.7]	полное разр.	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
			[0, 0.00015]			
		obj_2.2	[0, 0.59]	полное разр.	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
			[0, 0.0001]	средн. разр.	0	$[6.1, 8.2] \cdot 10^5$
		obj_2.3	[0, 0.47]	полное разр.	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
	[0, 0.0001]					
obj_2.4	[0, 0.47]	полное разр.	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$		
	[0, 0.0001]					
obj_2.5	[0, 0.7]	полное разр.	0	$[2,0, 2,4] \cdot 10^6$		
	[0, 0.0001]					
obj_2.6	[0, 0.38]	полное разр.	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$		
	[0, 0.0001]					
obj_3.1		загрязнение	1	[0, 8.4]		
имущество		уничтожение	1	$[0, 7.2] \cdot 10^4$		

Окончание таблицы 4.15

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,g}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка,</i> радиус зоны поражения $R_F$ , м	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.18, 4.1]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.18, 4.1]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.18, 4.1]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.18, 4.1]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.18, 4.1]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	[0, 8.4]
		имущество		уничтожение	1	$[0, 7.2] \cdot 10^4$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	[0, 8.4]
		имущество		уничтожение	1	$[0, 7.2] \cdot 10^4$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -3,g аварии на территории сливо-наливной эстакады, рассчитанный по соотношению (4.2):  
 $U_{-3,g} \in [0.06, 0.83] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии:  $P_{-3,g} \in [3, 7] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.16 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,ф аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,f}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.01, 0.05]	obj_1.1	[48.3, 55.7]	гибель	[0.09, 0.12]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.95, 0.97]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.13, 0.17]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[40.2, 41.9]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[19.5, 22.6]	гибель	[0.006, 0.0069]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.44, 0.48]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.009, 0.011]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[19.5, 22.6]	гибель	[0.006, 0.0069]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.44, 0.48]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.009, 0.011]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[19.5, 22.6]	гибель	[0.006, 0.0069]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.44, 0.48]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.009, 0.011]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[48.3, 55.7]	возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[40.2, 41.9]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[19.5, 22.6]	возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[19.5, 22.6]	возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
obj_2.5	[13.0, 15.6]	возгорание		$[2,0, 2,4] \cdot 10^6$		
obj_2.6	[15.6, 15.8]	возгорание	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$		
obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 8.1] \cdot 10^3$		
имущество		уничтожение	1	$[4.5, 8.9] \cdot 10^6$		

Продолжение таблицы 4.16

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,f}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,01, 0.05]	obj_1.1	[2.1, 4.6] [0.0002, 0.45]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[1.7, 3.3] [0.00015, 2.2]	контузия гибель	0 0	$[3, 4] \cdot 10^6$ $[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.64, 4.1] [0.00013, 0.33]	лег. травма тяж. травма	0 0	$[2.7, 3.6] \cdot 10^6$ $[5.4, 7.2] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[0.64, 4.1] [0.00013, 0.33]	гибель контузия	0 0	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[0.64, 4.1] [0.00013, 0.33]	гибель контузия	0 0	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[2.1, 4.6] [0.0002, 0.45]	полное разр.	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[1.7, 3.3] [0.00015, 2.2]	полное разр. средн. разр.	0 0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$ $[6.1, 8.2] \cdot 10^5$
		obj_2.3	[0.64, 4.1] [0.00013, 0.33]	полное разр.	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[0.64, 4.1] [0.00013, 0.33]	полное разр.	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
		obj_2.5	[1.7, 2.5] [0.00011, 0.36]	полное разр.	0	$[2,0, 2,4] \cdot 10^6$
		obj_2.6	[1.1, 1.9] [0.0001, 0.26]	полное разр.	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 8.1] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[4.5, 8.9] \cdot 10^6$

Продолжение таблицы 4.16

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,f}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>BLEVE</i> , скорость разлета осколков $u_{оск}$ , м/с	[0,056, 0.28]	obj_1.1	[5.6, 12.3]	гибель	0.05	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2		гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3		гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4		гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5		гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1		полное разр.	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2		полное разр.	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3		полное разр.	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4		полное разр.	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
		obj_2.5		полное разр.	0	$[2,0, 2,4] \cdot 10^6$
obj_2.6	полное разр.	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$			
имущество	уничтожение	1	$[4.5, 8.9] \cdot 10^6$			
<i>Пожар-вспышка</i> , радиус зоны поражения $R_F$ , м	[0.01, 0.05]	obj_1.1	[0.28, 39]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.28, 39]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.28, 39]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.28, 39]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.28, 39]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 8.1] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[4.5, 8.9] \cdot 10^6$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.02, 0.1]	obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 8.1] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[4.5, 8.9] \cdot 10^6$

Продолжение таблицы 4.16

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,f}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Факельное горение, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.056, 0.28]	obj_1.1	[27.3, 30.1]	гибель	[0.008, 0.011]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.7, 0.72]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.011, 0.015]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[22.2, 24.0]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[15.5, 19.6]	гибель	[0.004, 0.007]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.24, 0.35]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.007, 0.011]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[15.5, 19.6]	гибель	[0.004, 0.007]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.24, 0.35]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.007, 0.011]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[15.5, 19.6]	гибель	[0.004, 0.007]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.24, 0.35]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.007, 0.011]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[27.3, 30.1]	возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[22.2, 24.0]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[15.5, 19.6]	возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
obj_2.4	[15.5, 19.6]	возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$		
obj_2.5	[13.6, 15.1]	возгорание		$[2.0, 2.4] \cdot 10^6$		
obj_2.6	[14.2, 14.7]	возгорание	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$		
obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 2.2] \cdot 10^3$		
имущество		уничтожение	1	$[4.5, 8.9] \cdot 10^6$		

Окончание таблицы 4.16

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,f}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Огненный шар,</i> интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup> ; длительность свече- ния $t_{\text{ош}} \in [3.4, 13.8]$ с	[0.056, 0.28]	obj_1.1	[40.1, 51.7]	гибель	[0.98, 1.0]	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[51.2, 62.0]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[24.7, 42.3]	гибель	[0.82, 0.98]	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[24.7, 42.3]	гибель	[0.82, 0.98]	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[24.7, 42.3]	гибель	[0.82, 0.98]	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[40.1, 51.7]	возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[51.2, 62.0]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[24.7, 42.3]	возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[24.7, 42.3]	возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$
		obj_2.5	–	возгорание		$[2, 0, 2, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.6	[31.2, 33.0]	возгорание	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$
		имущество		уничтожение	1	$[4.5, 8.9] \cdot 10^6$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС  $-3,f$  аварии на территории сливо-наливной эстакады, рассчитанный по соотношению (4.2):  
 $U_{-3,f} \in [2.4, 14.4] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии:  $P_{-3,f} \in [0.75, 1.5] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.17 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,h аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,h}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[20.1, 24.3]	гибель	[0.0057, 0.0061]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.013, 0.02]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.008, 0.0099]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[21.7, 20.0]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[37.1, 38.5]	гибель	[0.051, 0.053]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.85, 0.86]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.094, 0.096]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[37.1, 38.5]	гибель	[0.051, 0.053]	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.85, 0.86]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.094, 0.096]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.5	[37.1, 38.5]	гибель	[0.83, 0.87]	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.98, 0.99]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	[0.9, 0.92]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[20.1, 24.3]	возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[21.7, 20.0]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
		obj_2.3		возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
obj_2.4		возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$		
obj_2.5	[17.7, 20.4]	возгорание	0	$[2.0, 2.4] \cdot 10^6$		
obj_2.6	[13.3, 14.0]	возгорание	0			
obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 1.8] \cdot 10^3$		
имущество		уничтожение	1	$[2.2, 3.3] \cdot 10^6$		

Продолжение таблицы 4.17

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,h}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[1.9, 4.0] [0.0001, 0.77]	гибель	0	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.2	[0.8, 1.5] [0.0001, 1.0]	контузия гибель	0 0	[3, 4]·10 <sup>6</sup> [3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[2.6, 4.8] [0.00013, 0.25]	лег. травма тяж. травма	0 0	[2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[2.6, 4.8] [0.00013, 0.25]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[2.6, 4.8] [0.00013, 0.25]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[1.9, 4.0] [0.0001, 0.77]	полное разр.	0	[5.6, 16.8]·10 <sup>6</sup> [9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[0.8, 1.5] [0.0001, 1.0]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup> [6.1, 8.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_2.3		полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[2.6, 4.8] [0.00013, 0.25]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.5	[1.3, 1.9] [0.0001, 0.09]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.6	[0.4, 0.81] [0.0001, 0.012]	полное разр.	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_3.1		загрязнение	1	[0, 1.8]·10 <sup>3</sup>
		имущество		уничтожение	1	[2.2, 3.3]·10 <sup>6</sup>

Окончание таблицы 4.17

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,h}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка,</i> радиус зоны поражения $R_F$ , м	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.4, 24]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.4, 24]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.4, 24]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.4, 24]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.4, 24]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 1.8] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[2.2, 3.3] \cdot 10^6$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 1.8] \cdot 10^3$
		имущество		уничтожение	1	$[2.2, 3.3] \cdot 10^6$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС  $-3,h$  аварии на территории сливо-наливной эстакады, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-3,h} \in [0.5, 2.9] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии:  $P_{-3,h} \in [0.75, 1.5] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.18 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,і аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,i}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[13.4, 15.0]	гибель	[0.004, 0.0049]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.011, 0.016]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.007, 0.0084]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[14.0, 14.9]	гибель	0	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
		obj_1.3	[27.2, 30.4]	гибель	[0.007, 0.012]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.65, 0.73]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.011, 0.016]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[27.2, 30.4]	гибель	[0.007, 0.012]	[6, 8]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.65, 0.73]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.011, 0.016]	[3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[28.1, 31.2]	гибель	[0.008, 0.013]	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
				ожог I ст.	[0.68, 0.74]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
				ожог II ст.	[0.012, 0.017]	[1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[13.4, 15.0]	возгорание	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[14.0, 14.9]	возгорание	0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[27.2, 30.4]	возгорание	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[27.2, 30.4]	возгорание	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
obj_2.5	[12.9, 14.4]	возгорание	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>		
obj_2.6	[11.0, 12.1]	возгорание	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>		
obj_3.1		загрязнение	1	[320, 360]		
имущество		уничтожение	1	[1.3, 1.5]·10 <sup>5</sup>		

Продолжение таблицы 4.18

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,i}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[1.7, 3.1] [0.0001, 0.58]	гибель контузия	0 0	[6, 8]·10 <sup>7</sup> [3, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[1.0, 1.7] [0.0001, 1.2]	гибель лег. травма тяж. травма	0 0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.3	[2.3, 4.5] [0.00012, 0.21]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[2.3, 4.5] [0.00012, 0.21]	гибель контузия	0 0	[6, 8]·10 <sup>7</sup> [3, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.5	[2.3, 4.5] [0.00012, 0.21]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1	[1.7, 3.1] [0.0001, 0.58]	полное разр.	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[1.0, 1.7] [0.0001, 1.2]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6] 10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[2.3, 4.5] [0.00012, 0.21]	полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[2.3, 4.5] [0.00012, 0.21]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.5	[1.1, 1.7] [0.0001, 0.07]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.6	[0.3, 0.42] [0.0001, 0.0009]	полное разр.	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>
		obj_3.1		загрязнение	1	[320, 360]
		имущество		уничтожение	1	[1.3, 1.5]·10 <sup>5</sup>

Окончание таблицы 4.18

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,i}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка, радиус зоны поражения <math>R_F</math>, м</i>	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[1.3, 13]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[1.3, 13]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[1.3, 13]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[1.3, 13]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[1.3, 13]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	[320, 360]
		имущество		уничтожение	1	$[1.3, 1.5] \cdot 10^5$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	[320, 360]
		имущество		уничтожение	1	$[1.3, 1.5] \cdot 10^5$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС  $-3,i$  аварии на территории сливо-наливной эстакады, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-3,i} \in [0.28, 2.2] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии:  $P_{-3,i} \in [1.2, 2.8] \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 4.19 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,к аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,к}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup></i>	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[1.4, 1.9]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.001, 0.001]	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[0.7, 0.9]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.001, 0.001]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.3	[2.9, 3.3]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.001, 0.001]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[2.9, 3.3]	ожог II ст.	0	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[2.8, 3.1]	ожог I ст.	[0.001, 0.001]	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	0	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[1.4, 1.9]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	[0.001, 0.001]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[0.7, 0.9]	ожог II ст.	0	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				возгорание	0	$[9.0, 11.2] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[0.7, 0.9]	возгорание	0	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
				возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[0.7, 0.9]	возгорание	0	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
возгорание	0			$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$		
obj_2.5	[0.9, 1.2]	возгорание	0	$[4.4, 5.0] \cdot 10^6$		
		возгорание	0	$[2.0, 2.4] \cdot 10^6$		
obj_2.6	[0.7, 0.8]	возгорание	0	$[2.0, 2.4] \cdot 10^6$		
		возгорание	0	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$		
obj_3.1 имущество	[0.7, 0.8]	загрязнение	1	130		
		уничтожение	1	$[2.6, 2.6] \cdot 10^3$		

Продолжение таблицы 4.19

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,k}$					
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей	
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа; импульс фазы сжатия $\Gamma^+$ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[0.15, 0.35] [0.0001, 0.021]	гибель контузия	0 0	[6, 8]·10 <sup>7</sup> [3, 4]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.2	[0.14, 0.31] [0.0001, 0.018]	гибель лег. травма тяж. травма	0 0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [2.7, 3.6]·10 <sup>6</sup> [5.4, 7.2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.3	[0.22, 0.34] [0.0001, 0.023]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.4	[0.22, 0.34] [0.0001, 0.023]	гибель контузия	0 0	[6, 8]·10 <sup>7</sup> [3, 4]·10 <sup>6</sup>	
		obj_1.5	[1.1, 2.2] [0.0001, 0.082]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.1	[0.15, 0.35] [0.0001, 0.023]	полное разр.	0	[9.0, 11.2]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.2	[0.14, 0.31] [0.0001, 0.018]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.3	[0.22, 0.34] [0.0001, 0.023]	полное разр.	0	[2.2, 2.5]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.4	[0.22, 0.34] [0.0001, 0.023]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.5	[0.2, 0.33] [0.0001, 0.022]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 <sup>6</sup>	
		obj_2.6	[0.16, 0.18] [0.0001, 0.0006]	полное разр.	0	[6.9, 7.2]·10 <sup>5</sup>	
		obj_3.1		имущество	загрязнение уничтожение	1 1	130 [2.6, 2.6]·10 <sup>3</sup>

Окончание таблицы 4.19

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,k}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка</i> , радиус зоны поражения $R_F$ , м	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.31, 3.6]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.31, 3.6]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.31, 3.6]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.31, 3.6]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.31, 3.6]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	130
		имущество		уничтожение	1	$[2.6, 2.6] \cdot 10^3$
Рассеивание облака ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	130
		имущество		уничтожение	1	$[2.6, 2.6] \cdot 10^3$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС  $-3,k$  аварии на территории сливо-наливной эстакады, рассчитанный по соотношению (4.2):  $U_{-3,k} \in [0.06, 0.4] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии:  $P_{-3,k} \in [3, 4.5] \cdot 10^{-3}$ .

Окончательно, целевая метрика RR аварийного риска ВПОО "Сливо-наливная эстакада склада светлых нефтепродуктов", рассчитанная по формуле (4.1), составляет:  $RR \in [0.088, 1.1] \cdot 10^5$  рублей/год.

## 4.5 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Технологический блок газораспределительной станции"

### 4.5.1 Экономические оценки

Для выполнения экономических оценок ущерба от аварии принимаем следующие значения: а) стоимость природного газа составляет [5, 6] руб/м<sup>3</sup>; б) восстановительную стоимость здания оценим с помощью [99], [76], [71]. С учетом строительного объема (768 м<sup>3</sup>) здания его восстановительная стоимость на ] 2018 год равна 768·[7556, 9175], или [5.9, 7.2] 10<sup>6</sup> рублей. Оценку денежного эквивалента гуманитарного ущерба выполним согласно [32], [77].

### 4.5.2 Параметры объектов-мишеней

*Перечень объектов-мишеней.* В рассматриваемом взрывопожароопасном объекте имеются объекты-мишени двух типов:

- 1) персонал: *obj\_1.1* – операторы, два человека, находящиеся в здании технологического блока с условной вероятностью 0.1;
- 2) здания и технологическое оборудование: *obj\_2.1* – здание и оборудование технологического блока.

Начало локальной системы координат совместим с левым нижним углом здания, ее оси направим вдоль ограждающих конструкций (стен) – ось ОУ вдоль длинной стены.

*Брус объектов-мишеней* ОВJ размером 2×8, таблица 4.20.

Таблица 4.20 – *Брус ОВJ объектов-мишеней аварии в ВПОО "Технологический блок ГРС"*

Объект	Первый	Второй	Третий	Четвертый	Пятый	Шестой	Седьмой	Восьмой
obj_1.1	[0, 8]	0, 16]	0.1	2	1	1	2	[3, 4]·10 <sup>7</sup>
obj_2.1	[0, 8]	0, 16]	1	6	5	0	1	[5.9, 7.2]·10 <sup>6</sup>

### 4.5.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Технологический блок газораспределительной станции"

Перечень возможных сценариев аварии в рассматриваемом ВПОО для четырех вариантов ее головного события проанализирован нами в разделе 3.6. третьей главы диссертации. Полученные оценки взвешенного ущерба для этих вариантов вариантов ГС аварии отразим в таблицах 4.21 – 4.24. В завершении раздела рассчитаем целевую метрику RR аварийного риска ВПОО "Технологический блок" газораспределительной станции.

Таблица 4.21 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,d аварии в здании технологического блока ГРС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,d}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Физический взрыв при разрушении сосуда, летящие обломки, скорость разлета <math>u_{оск}</math>, м/с</i>	1,0	obj_1.1	[3.5, 3.7]	Гибель	0,01	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[3.5, 3.7]	тяжелая травма	0,01	$[5.4, 7.2] \cdot 10^6$
		имущество		полное разрушение	0	$[5.9, 7.0] \cdot 10^6$
				средние разрушения	0	$[1.8, 2.3] \cdot 10^6$
				уничтожение	1	$[6.0, 6.5] \cdot 10^5$
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа</i>	[0,12, 0.6]	obj_1.1	[80.7, 87.3]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[80.7, 87.3]	полное разрушение	1	$[5.9, 7.0] \cdot 10^6$
		имущество		уничтожение	1	$[6.0, 6.5] \cdot 10^5$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,d аварии в технологическом блоке ГРС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{-2,d} \in [1.0, 6.8] \cdot 10^6$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,d} \in [1, 2] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.22 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,c аварии в здании технологического блока ГРС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,c}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Факельное горение, длина факела <math>L_F</math>, м</i>	[0.007, 0.035]	obj_1.1	[3.2, 27.7]	гибель	0,01	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[3.2, 27.7]	повреждение	0	$[1.8, 2.3] \cdot 10^6$
		имущество		уничтожение	1	[230, 300]
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа</i>	[0.048, 0.24]	obj_1.1	[0, 87.3]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[0, 87.3]	полное разрушение	1	$[5.9, 7.0] \cdot 10^6$
		имущество		уничтожение	1	[230, 300]

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,c аварии в технологическом блоке ГРС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{-2,c} \in [0.3, 1.8] \cdot 10^6$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,c} \in [1, 2] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.23 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,в аварии в здании технологического блока ГРС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,b}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Физический взрыв при разрушении сосуда, летящие обломки, скорость разлета <math>u_{оск}</math>, м/с</i>	1,0	obj_1.1	[61.7, 82.6]	гибель	0,01	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[61.7, 82.6]	повреждение	0	$[4.8, 5.0] \cdot 10^4$
		имущество		уничтожение	1	$[4.6, 7.1] \cdot 10^3$
<i>Факельное горение, длина факела <math>L_F</math>, м</i>	[0.007, 0.035]	obj_1.1	[10.3, 60.6]	гибель	0,01	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[10.3, 60.6]	повреждение	0	$[5.9, 7.0] \cdot 10^6$
		имущество		уничтожение	1	$[4.6, 7.1] \cdot 10^3$
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа</i>	[0.048, 0.24]	obj_1.1	[318, 489]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[318, 489]	полное разрушение	1	$[5.9, 7.0] \cdot 10^6$
		имущество		уничтожение	1	$[4.6, 7.1] \cdot 10^3$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,в аварии в технологическом блоке ГРС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{-2,b} \in [3.4, 6.7] \cdot 10^6$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,b} \in [0.77, 4.6] \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4.24 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,а аварии в здании технологического блока ГРС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного о ущерба $U_{-2,a}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Факельное горение, длина факела <math>L_F</math>, м</i>	[0.001, 0.005]	obj_1.1	[2.33, 2.49]	гибель	0,001	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[2.33, 2.49]	повреждение	0	$[5.9, 7.0] \cdot 10^6$
		имущество		уничтожение	1	[25, 114]
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа</i>	[0.016, 0.08]	obj_1.1	[8.9, 34.3]	гибель	[0.5, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_2.1	[8.9, 34.3]	полное разрушение	1	$[5.9, 7.0] \cdot 10^6$
		имущество		уничтожение	1	[25, 114]

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,а аварии в технологическом блоке ГРС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{-2,a} \in [1.2, 8.9] \cdot 10^5$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,a} \in [3.1, 4.6] \cdot 10^{-5}$ .

Окончательно, целевая метрика RR аварийного риска ВПОО "Технологический блок ГРС", рассчитанная по формуле (4.1), составляет:  $RR \in [43, 521]$  рублей/год.

## 4.6 Интервально-матричная оценка аварийного риска ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция"

### 4.6.1 Экономические оценки

Для выполнения экономических оценок ущерба от аварии принимаем следующие значения: а) стоимость передвижного сосуда для СУГ  $[2.6, 2.8] \cdot 10^6$  рублей; б) стоимость автомобиля-тягача (МАЗ, КАМАЗ)  $[3.5, 4.2] \cdot 10^6$  рублей; в) стоимость заправляемого легкового автомобиля  $[0.1, 1.5] \cdot 10^6$  рублей; г) стоимость СУГ  $[1.7, 1.9] \cdot 10^4$  руб/м<sup>3</sup>.

Оценку денежного эквивалента гуманитарного ущерба выполним согласно [32], [77], экологического ущерба – согласно [60], [62], [63], [72], [78].

### 4.6.2 Параметры объектов-мишеней

*Перечень объектов-мишеней.* На рассматриваемом взрывопожароопасном объекте имеются объекты-мишени трех типов:

1) люди: *obj\_1.1* – оператор, один человек, постоянно; *obj\_1.2* – водитель автогазовоза, один человек, вероятность нахождения 0.015; *obj\_1.3* – водитель заправляемого автомобиля, один человек, вероятность нахождения 0.6; *obj\_1.4* – пассажиры заправляемого автомобиля, два человека, вероятность нахождения 0.4;

2) здания и технологическое оборудование: *obj\_2.1* – сосуд для СУГ (расходный), вероятность нахождения 1.0; *obj\_2.2* – сосуд для СУГ ("донор"), вероятность нахождения 0.0017; *obj\_2.3* – седельный тягач (МАЗ, КАМАЗ), вероятность нахождения 0.015; *obj\_2.4* – заправляемый легковой автомобиль, вероятность нахождения 0.6;

3) *obj\_3.1* – атмосферный воздух.

*Брус объектов-мишеней* OBJ размером 8×8, таблица 4.25.

Таблица 4.25 – *Брус OBJ объектов-мишеней аварии на ВПОО "АГЗС"*

Объект	Первый	Второй	Третий	Четвертый	Пятый	Шестой	Седьмой	Восьмой
obj_1.1	[5, 7]	[6, 8]	1.0	2	1	1	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.2	[4, 6]	[10, 12]	0.015	2	1	1	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.3	[6, 7]	[6, 8]	0.6	2	1	1	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.4	[-2, -3]	[-5, -8]	0.4	2	1	1	2	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_2.1	[2, 2]	[1, 8]	1.0	6	4	0	1	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
obj_2.2	[4, 4]	[1, 8]	0.0017	6	4	0	1	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
obj_2.3	[4, 6]	[8, 12]	0.015	6	6	0	1	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$
obj_2.4	[6, 9]	[5, 9]	0.6	6	6	0	1	$[0.1, 1.5] \cdot 10^6$

#### **4.6.3 Расчет целевой метрики аварийного риска ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция"**

Перечень возможных сценариев развития аварии на рассматриваемом взрывопожароопасном объекте для шести вариантов ее головного события проанализирован нами в разделе 3.5. третьей главы диссертации. Полученные оценки взвешенного ущерба для этих вариантов ГС аварии отразим в таблицах 4.26 – 4.31.

В завершении раздела рассчитаем целевую метрику RR аварийного риска ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция".

Таблица 4.26 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,а аварии на территории АГЗС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{2,b}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Факельное горение, интенсивность падающего теплового потока <math>I</math>, кВт/м<sup>2</sup> длина факела <math>L_F</math>, м</i>	[0.011, 0.057]	obj_1.1	[24.4, 82.6] [10.5, 26.4]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.16, 1.0] [1.0, 1.0] [0.3, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[21.0, 75.3] [10.5, 26.4]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.13, 1.0] [1.0, 1.0] [0.25, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.3	[23.8, 79.7] [10.5, 26.4]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.15, 1.0] [1.0, 1.0] [0.28, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[10.4, 55.5] [10.5, 26.4]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.06, 0.92] [1.0, 1.0] [0.1, 0.96]	$[6, 8] \cdot 10^7$ $[3, 8] \cdot 10^6$ $[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_2.1		возгорание	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[23.8, 79.7] [10.5, 26.4]	возгорание	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[20.5, 71.1] [10.5, 26.4]	возгорание	0	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[23.8, 79.7] [10.5, 26.4]	возгорание	0	$[0.1, 1.5] \cdot 10^5$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 2.7] \cdot 10^4$
		имущество		уничтожение	1	$[3.0, 3.4] \cdot 10^5$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,а аварии на территории АГЗС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{2,a} \in [0.029, 1.3] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,a} = 5 \cdot 10^{-7}$ .

Таблица 4.27 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,в аварии на территории АГЗС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,b}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Факельное горение, интенсивность падающего теплового потока <math>I</math>, кВт/м<sup>2</sup> длина факела <math>L_F</math>, м</i>	[0.011, 0.057]	obj_1.1	[24.8, 121.7] [22.1, 46.3]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.17, 1.0] [1.0, 1.0] [0.33, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[21.0, 116.2] [22.1, 46.3]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.13, 1.0] [1.0, 1.0] [0.26, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.3	[23.9, 118.0] [22.1, 46.3]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.15, 1.0] [1.0, 1.0] [0.28, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$ $[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[10.3, 88.2] [22.1, 46.3]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.06, 0.92] [1.0, 1.0] [0.1, 0.96]	$[6, 8] \cdot 10^7$ $[3, 8] \cdot 10^6$ $[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_2.1		возгорание	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[23.9, 118.0] [22.1, 46.3]	возгорание	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[21.4, 110.1] [22.1, 46.3]	возгорание	0	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[23.9, 118.0] [22.1, 46.3]	возгорание	0	$[0.1, 1.5] \cdot 10^5$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 2.7] \cdot 10^4$
		имущество		уничтожение	1	$[3.0, 3.4] \cdot 10^5$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,в аварии на территории АГЗС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{-2,b} \in [0.31, 1.3] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,b} = 2.5 \cdot 10^{-7}$ .

Таблица 4.28 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,1 аварии на территории АГЗС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,1}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Факельное горение, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup> длина факела L<sub>F</sub>, м</i>	[0.011, 0.057]	obj_1.1	[21.6, 33.9] [5.0, 9.1]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.079, 0.54] [0.98, 1.0] [0.16, 0.79]	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[19.3, 30.2] [5.0, 9.1]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.066, 0.47] [0.97, 1.0] [0.14, 0.41]	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.3	[20.5, 31.1] [5.0, 9.1]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.07, 0.5] [0.98, 1.0] [0.15, 0.51]	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[12.7, 14.0] [5.0, 9.1]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.06, 0.3] [0.8, 0.96] [0.09, 0.032]	[6, 8]·10 <sup>7</sup> [3, 8]·10 <sup>6</sup> [3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1		возгорание	0	[2.6, 2.8]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[20.5, 31.1] [5.0, 9.1]	возгорание	0	[2.6, 2.8]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[19.1, 30.3] [5.0, 9.1]	возгорание	0	[3.5, 4.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[20.5, 31.1] [5.0, 9.1]	возгорание	0	[0.1, 1.5]·10 <sup>5</sup>
		obj_3.1		загрязнение	1	[0, 2.7]·10 <sup>4</sup>
		имущество		уничтожение	1	[3.0, 3.4]·10 <sup>5</sup>

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,1 аварии на территории АГЗС, рассчитанный по соотношению (4.2):  
 $U_{-2,1} \in [0.18, 6.3] \cdot 10^6$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,1} \in [1.3, 5.4] \cdot 10^{-6}$ .

Таблица 4.29 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,т аварии на территории АГЗС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,m}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Факельное горение, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м<sup>2</sup> длина факела L<sub>F</sub>, м</i>	[0.011, 0.057]	obj_1.1	[26.4, 112.8] [31.9, 57.8]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.23, 1.0] [1.0, 1.0] [0.42, 1.0]	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.2	[22.3, 101.5] [31.9, 57.8]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.2, 1.0] [1.0, 1.0] [0.33, 1.0]	[3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.3	[25.1, 109.9] [31.9, 57.8]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.4, 1.0] [1.0, 1.0] [0.38, 1.0]	3, 4]·10 <sup>7</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup> [1.5, 4]·10 <sup>6</sup>
		obj_1.4	[18.0, 98.1] [31.9, 57.8]	гибель ожог I ст. ожог II ст.	[0.15, 1.0] [1.0, 1.0] [0.22, 1.0]	[6, 8]·10 <sup>7</sup> [3, 8]·10 <sup>6</sup> [3, 8]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.1		возгорание	0	[2.6, 2.8]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.2	[20.3, 99.1] [31.9, 57.8]	возгорание	0	[2.6, 2.8]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.3	[22.3, 101.5] [31.9, 57.8]	возгорание	0	[3.5, 4.2]·10 <sup>6</sup>
		obj_2.4	[22.7, 102.3] [31.9, 57.8]	возгорание	0	[0.1, 1.5]·10 <sup>5</sup>
		obj_3.1		загрязнение имущество	1 1	[0, 2.7]·10 <sup>4</sup> [3.0, 3.4]·10 <sup>5</sup>

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,т аварии на территории АГЗС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{-2,m} \in [0.48, 1.4] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,m} \in [1.4, 5.5] \cdot 10^{-7}$ .

Таблица 4.30 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2,о аварии на территории АГЗС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,о}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа; импульс фазы сжатия <math>\Gamma^+</math>, Па·с</i>	[0.0024, 0.012]	obj_1.1	[0, 83.4]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
			[0, 1077]	контузия	0	$[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[0, 81.3]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
			[0, 994]	контузия	0	$[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.3	[0, 80.6]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
			[0, 911]	контузия	0	$[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[0, 70.1]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
			[0, 756]	контузия	0	$[3, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[0, 83.4]	разрушение	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
			[0, 1077]			
		obj_2.2	[0, 80.6]	разрушение	0	$2.6, 2.8] \cdot 10^6$
	[0, 911]					
obj_2.3	[0, 82.6]	разрушение	0	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$		
	[0, 934]					
obj_2.4	[0, 80.6]	разрушение	0	$[0.1, 1.5] \cdot 10^5$		
	[0, 911]					
obj_3.1		загрязнение	1	[0, 59]		
имущество		уничтожение	1	$[4, 8] \cdot 10^5$		
<i>Пожар-вспышка, радиус зоны поражения <math>R_F</math>, м</i>	[0.034, 0.17]	obj_1.1	[0, 18.6]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0, 18.6]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0, 18.6]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0, 18.6]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		имущество		уничтожение	1	$[3.0, 3.4] \cdot 10^5$

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,о аварии на территории АГЗС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{-2,о} \in [0.51, 3.4] \cdot 10^7$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2,о} = 2 \cdot 10^{-7}$ .

Таблица 4.31 – *Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -2, с аварии на территории АГЗС*

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2,c}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Взрыв ТВС, избыточное давление взрыва <math>\Delta P</math>, кПа; импульс фазы сжатия <math>\Gamma^+</math>, Па·с</i>	[0.0024, 0.012]	obj_1.1	[0.2, 0.41] [1528, 8496]	гибель контузия	$[0, 0.8] \cdot 10^{-3}$ 0	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[0.18, 0.39] [1503, 7962]	гибель контузия	$[0, 0.77] \cdot 10^{-3}$ 0	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.3	[0.17, 0.37] [1493, 7677]	гибель контузия	$[0, 0.72] \cdot 10^{-3}$ 0	$[3, 4] \cdot 10^7$ $[1.5, 2] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[0.11, 0.22] [1111, 6002]	гибель контузия	$[0, 0.33] \cdot 10^{-3}$ 0	$[6, 8] \cdot 10^7$ $[3, 4] \cdot 10^6$
		obj_2.1		разрушение	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[0.17, 0.37] [1493, 7677]	разрушение	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.3	[0.18, 0.39] [1503, 7962]	разрушение	0	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$
		obj_2.4	[0.17, 0.37] [1493, 7677]	разрушение	0	$[0.1, 1.5] \cdot 10^5$
		obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 2.7] \cdot 10^4$
		имущество		уничтожение	1	$[2.5, 5.1] \cdot 10^6$
<i>Пожар-вспышка, радиус зоны поражения <math>R_F</math>, м</i>	[0.034, 0.17]	obj_1.1	[31.9, 121]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[31.9, 121]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[31.9, 121]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[31.9, 121]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		имущество		уничтожение	1	$[2.5, 5.1] \cdot 10^6$

Продолжение таблицы 4.31

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2c}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар пролива,</i> интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup>	[0, 0.29]	obj_1.1	[72, 80]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	1	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	1	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.2	[71.4, 80]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	1	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	1	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.3	[70.3, 80]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	1	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	1	$[1.5, 4] \cdot 10^6$
		obj_1.4	[70.5, 80]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
				ожог I ст.	1	$[3, 8] \cdot 10^6$
				ожог II ст.	1	$[3, 8] \cdot 10^6$
		obj_2.1	[71.1, 80]	уничтожение	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[72, 80]	уничтожение	1	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
obj_2.3	[70.4, 80]	уничтожение	1	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$		
obj_2.4	[71.5, 80]	уничтожение	1	$[0.1, 1.5] \cdot 10^5$		
obj_3.1		загрязнение	1	$[0, 2.7] \cdot 10^4$		
имущество		уничтожение	1	$[2.5, 5.1] \cdot 10^6$		
<i>BLEVE,</i> скорость разлета осколков $u_{оск}$ , м/с	[0, 0.21]	obj_1.1	[53, 284]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.2		гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3		гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4		гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_2.1		полное разр.	1	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.2		полное разр.	1	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.3		полное разр.	1	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$
		obj_2.4		полное разр.	1	$[0.1, 1.5] \cdot 10^5$

Окончание таблицы 4.31

Сценарий аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-2c}$					
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики	Заданный ущерб	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей	
<i>Огненный шар,</i> интенсивность падающего теплового потока $I$ , кВт/м <sup>2</sup> время жизни ОШ, $t_{ОШ}$ , с	[0, 0.21]	obj_1.1	[0, 87.1]	гибель	[0, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$	
			[0, 9.4]	ожог I ст.	[0, 1.0]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$	
		obj_1.2	[0, 84,5]	ожог II ст.	[0, 1.0]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$	
			[5.0, 9.1]	гибель	[0, 1.0]	$[3, 4] \cdot 10^7$	
		obj_1.3	[0, 83.7]	ожог I ст.	[0, 1.0]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$	
			[5.0, 9.1]	ожог II ст.	[0, 1.0]	$[1.5, 4] \cdot 10^6$	
		obj_1.4	[0, 72.0]	гибель	[0, 1.0]	$[6, 8] \cdot 10^7$	
			[5.0, 9.1]	ожог I ст.	[0, 1.0]	$[3, 8] \cdot 10^6$	
		obj_2.1	[0, 83.7]	obj_2.1	ожог II ст.	[0, 1.0]	$[3, 8] \cdot 10^6$
					возгорание	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
		obj_2.2	[5.0, 9.1]	obj_2.2	возгорание	0	$[2.6, 2.8] \cdot 10^6$
					повреждение	[0, 1.0]	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$
obj_2.3	[5.0, 9.1]	obj_2.3	повреждение	[0, 1.0]	$[3.5, 4.2] \cdot 10^6$		
			повреждение	[0, 1.0]	$[0.1, 1.5] \cdot 10^5$		
obj_2.4	[5.0, 9.1]	obj_2.4	повреждение	[0, 1.0]	$[0.1, 1.5] \cdot 10^5$		
имущество		имущество	уничтожение	1	$[2.5, 5.1] \cdot 10^6$		

Итого, взвешенный ущерб варианта ГС -2,с аварии на территории АГЗС, рассчитанный по соотношению (4.2):

$U_{-2c} \in [0.052, 1.5] \cdot 10^8$  рублей, вероятность реализации данного варианта ГС аварии  $P_{-2c} \in 5 \cdot 10^{-7}$ .

Окончательно, целевая метрика RR аварийного риска для ВПОО "Автомобильная газозаправочная станция", рассчитанная по формуле (4.1), составляет:  $RR \in [3.9, 102]$  рублей/год.

#### 4.7 Нормирование интервальных метрик аварийного риска

На пути практического использования интервального подхода к количественной оценке аварийного (пожарного) риска объектов нефтегазовой отрасли стоит нерешенная проблема сравнения полученных целевых метрик риска, выраженных интервальными числами, с пороговыми критериями приемлемого риска, заданных на законодательном или нормативном уровне скалярами, [51] (скалярные числа можно рассматривать как вырожденные интервалы).

Между тем прецеденты решения подобной задачи имеются. Например, в области радиационной гигиены в России действуют методические указания МУК 2.6.1.1194-03 [65], регламентирующие радиационный контроль пищевых продуктов. В них реализован международный подход, давно используемый и рекомендуемый МАГАТЭ в области радиационной безопасности.

Согласно этому документу для оценки радиационной безопасности пищевых продуктов (по удельной активности изотопов цезия-137 и стронция-90) используются безразмерные параметры:

а) показатель соответствия В:

$$B = \left( \frac{A_{уд}}{H} \right)_{Sr} + \left( \frac{A_{уд}}{H} \right)_{Cs}, \quad (4.4)$$

б) измерительная неопределенность его определения  $\Delta B$ :

$$\Delta B = \sqrt{\left( \frac{\Delta A}{H} \right)_{Sr}^2 + \left( \frac{\Delta A}{H} \right)_{Cs}^2}, \quad (4.5)$$

где  $A_{уд}$  – измеренное значение удельной активности радионуклида в пробе, Бк/кг;

$\Delta A$  – измерительная неопределенность удельной активности при доверительной вероятности ( $P = 0.95$ ), Бк/кг,

значения которых рассчитывают по результатам измерений в пробе;

$H$  – допустимый уровень удельной активности радионуклида в испытуемом продукте, Бк/кг, заданный нормативным документом по радиационной безопасности.

В МУК 2.6.1.1194-03 радиационная безопасность пищевых продуктов характеризуется параметром интервальной природы, включающим измерительную неопределенность. Согласно [65] пищевые продукты можно признать:

А) безусловно соответствующими критерию радиационной безопасности при выполнении условия

$$B + \Delta B \leq 1; \quad (4.6)$$

Б) безусловно не соответствующими критерию радиационной безопасности, если

$$B - \Delta B \geq 1. \quad (4.7)$$

В случае же

$$B + \Delta B \geq 1 \quad (4.8)$$

пищевые продукты нельзя признать соответствующими критерию радиационной безопасности.

Таким образом, если верхняя граница интервала показателя соответствия оказалась меньше точечного нормативного значения, безопасность, несомненно, обеспечена. Аналогично, пищевой продукт признается безусловно опасным в радиационном отношении, если нижняя граница интервала превышает норматив.

В ситуации же, когда норматив-скаляр оказывается в пределах интервального значения показателя соответствия, четкий и однозначный вывод о радиационной безопасности исследуемого продукта сделан быть не может. Требуются новые, более точные измерения (с меньшей измерительной неопределенностью).

Подобный подход может быть реализован и при нормировании аварийного риска объектов нефтяной отрасли. При этом, в отличие от действующего подхода, в качестве показателя риска следует рассматривать целевую метрику RR аварийного риска на рассматриваемом взрывопожароопасном объекте, являющуюся интервальным числом. Нормативное значение аварийного риска NR в общем случае также может быть задано интервальным числом (интервалом).

В таком случае в рамках риск-ориентированного подхода к управлению промышленной и пожарной безопасностью возникнет проблема сравнения двух величин интервальной природы – рассчитанной целевой метрики RR и норматива NR.

Подобная задача, вообще говоря, давно решена в рамках интервального анализа: пусть рассчитанная целевая метрика риска RR есть интервал  $[\underline{a}, \bar{a}]$ , а норматив риска NR – интервал  $[\underline{b}, \bar{b}]$ , где  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  – нижние, а  $\bar{a}$  и  $\bar{b}$  – верхние границы соответствующих интервалов. В таком случае следует принять, что:

а) пожарная (промышленная) безопасность рассматриваемого взрывопожароопасного объекта *безусловно обеспечена*, если  $RR < NR$ , что эквивалентно  $\bar{a} < \underline{b}$ ;

б) пожарная (промышленная) безопасность рассматриваемого объекта *безусловно не обеспечена*, если  $RR > NR$ , т.е.  $\underline{a} > \bar{b}$ ;

в) эксплуатация рассматриваемого взрывопожароопасного объекта возможна при условии разработки дополнительных защитных мер, если окажется  $RR \cap NR \neq \emptyset$ .

Это предложение полностью соответствует хорошо известному "принципу светофора" нормирования безопасности (см. рисунок 1.2. первой главы диссертации):

1) ситуация (а) – "зеленая" область, никаких дополнительных мероприятий не требуется, безопасность взрывопожароопасного объекта обеспечена;

2) ситуация (б) – "красная" область, в предложенном виде проект не может быть реализован, эксплуатация действующего взрывопожароопасного объекта должна быть запрещена, ибо он слишком опасен;

3) ситуация (в) – "желтая область, следует реализовать подход best practices (использование наилучших из известных технологий).

#### 4.8 Выводы по главе 4

В качестве основных выводов, которые могут быть сделаны на основании настоящей главы, назовем следующее:

1 Многомерные математические объекты, каковыми являются матрицы, более всего подходят для компактной записи всей совокупности необходимых исходных параметров модели (как самого взрывопожароопасного объекта, так и объектов-мишеней, которые могут оказаться в области поражающих факторов аварии).

2 Наличие параметрической неопределенности в задаче количественного оценивания аварийного риска может быть учтено использованием интервальных матриц.

3 Свертка матриц по соотношениям (4.1) – (4.3) позволяет получить целевую метрику  $RR$  аварийного риска взрывопожароопасного объекта в виде интервального числа, что отвечает основному предназначению методологии риск-ориентированного подхода к управлению пожарной и промышленной безопасностью.

Обладание критерием риска в виде числа позволяет:

- нормировать аварийный и пожарный риски объектов нефтегазовой отрасли;
- сравнивать, ранжировать взрывопожароопасные объекты нефтегазовой отрасли по промышленной и/или пожарной опасности;
- выбирать оптимальные управленческие решения по повышению пожарной и промышленной безопасности из серии альтернативных вариантов.

В частности, в главе показано, что из пяти проанализированных взрывопожароопасных объектов наиболее опасным по данному критерию оказалась сливо-наливная эстакада светлых нефтепродуктов.

4 Целевая метрика RR аварийного риска ВПОО сочетает в себе его важнейшие характеристики – вероятность различных вариантов реализации аварии, величину учитываемых видов ущерба от аварий (в денежном эквиваленте) и условные вероятности их причинения.

5 Предложенный интервально-матричный метод оценки аварийного риска является наиболее полным, поскольку он учитывает все подлежащие учету в рамках утвержденного метода КОР:

- а) варианты головного события аварии;
- б) возможные сценарии ее дальнейшего развития;
- в) составляющие ущерба аварий.

6 В главе предложен метод нормирования интервальных метрик аварийного (пожарного) риска.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основным результатом диссертационного исследования являются следующее:

1 На основании результатов выполненных автором теоретических исследований разработаны научные основы методов анализа и количественной оценки неопределенности, сопровождающей процедуру количественной оценки аварийного (пожарного) риска взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли, предложен ее универсальный алгоритм, включающий пять этапов:

- 1) оценка параметров головного события аварии;
- 2) определение перечня сценариев аварии и их условных вероятностей;
- 3) оценка величины поражающих факторов аварии;
- 4) максимально полная оценка всех видов ущерба от аварии в натуральном выражении;

- 5) расчет денежного эквивалента всех составляющих полного аварийного ущерба.

2 Анализ действующих отечественных Руководств по количественной оценке аварийного (пожарного) риска позволил выявить основные содержащиеся в них источники терминологической, модельной и параметрической неопределенности. С целью ее минимизации в нормативно-методических документах по количественной оценке аварийного и пожарного рисков на взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли разработаны практические рекомендации.

3 Доказана возможность выполнения КОР объектов нефтегазовой отрасли в интервальной постановке. Параметры аварийного риска рассчитывались в рамках интервального анализа методами Р.Мура, глобальной оптимизации и аффинного представления параметров, а при наличии термодинамической связности параметров – с использованием комбинации этих методов, что позволило минимизировать вычислительную неопределенность интервальных расчетов.

4 В работе показано, что выполнение количественной оценки аварийного риска взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли в интервальной постановке позволяет быстро оценивать значимость параметров (параметрическую чувствительность) используемых физико-математических моделей аварийных процессов, что дает существенный выигрыш во времени в сравнении с традиционными методами статистического моделирования, применяемыми с этой целью.

5 Для целей риск-ориентированного подхода к управлению пожарной и промышленной безопасностью взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли разработан интервально-матричный метод оценки и управления аварийным риском. Данный метод, учитывая все возможные:

- варианты головного события аварии;
- сценарии ее дальнейшего развития;
- виды аварийного ущерба в монетарном выражении,

позволяет наиболее полно учесть аварийный риск рассматриваемого взрывопожароопасного объекта и оценить его комплексной целевой метрикой в виде интервального числа. Использование подобной метрики делает возможным управление риском на разных стадиях жизненного цикла ВПОО нефтегазовой отрасли – сравнение и ранжирование альтернативных решений на проектной стадии, при разработке для них специальных технических условий (СТУ) и обоснований безопасности.

6 Разработанный интервально-матричный метод количественной оценки и управления аварийным риском успешно апробирован на пяти взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли, на которых обращаются пожароопасные вещества разного типа: легковоспламеняющаяся жидкость, сжиженный углеводородный газ, компримированный природный газ. Это доказывает универсальность предложенного метода.

7 Предложен метод нормирования интервальных метрик аварийного (пожарного) риска, имеющий существенное значение для управления пожарной и промышленной безопасностью взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли, как на проектной стадии, так и на стадии их эксплуатации, поскольку делает возможным обоснование управленческих решений с учетом наличия неопределенности.

Таким образом, в работе проанализированы основные источники неопределенности количественной оценки аварийного риска, изложен новый научно обоснованный подход к количественной оценке и управлению аварийным риском взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли в интервальной постановке, результатом которого является комплексная целевая метрика в виде интервального числа, содержащая оценку его неопределенности, внедрение которого внесет значительный вклад в развитие страны, так как данный подход позволяет существенно повысить их пожарную (промышленную) безопасность, поскольку, ликвидируя скрытую неопределенность точечных оценок, он улучшает информационное обеспечение выбора оптимальных решений при их проектировании и разработке для них защитных мероприятий.

Разработанные в диссертации методы анализа неопределенности и ее количественной оценки в интервальной постановке являются достаточно универсальными. Их объектной областью, наряду со взрывопожароопасными объектами нефтегазовой отрасли, могут быть опасные технологические и транспортные объекты и других типов. Предметная область методов также принципиально не ограничена рамками анализа аварийного и пожарного рисков.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ААР – анализ аварийного риска

АГЗС – автомобильная газозаправочная станция

АТР – анализ техногенного риска

АЭС – атомная электростанция

ВБ – Всемирный Банк

ВВ – взрывчатое вещество

ВВВ – воздушная взрывная волна

ВВС – воздушная волна сжатия

ВВП – внутренний валовой продукт

ВКПР – верхний концентрационный предел воспламенения (распространения пламени)

ВМО – Всемирная метеорологическая организация

ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения

ВУВ – воздушная ударная волна

ГВС – газовоздушная смесь

ГРС – газораспределительная станция

ГС – головное событие

ГТС – гидротехническое сооружение

ДГБ – диаграмма типа "галстук-бабочка"

ДО – дерево отказов

ДС – дерево событий

ИЗ – источник зажигания

КАН – качественный анализ неопределённости

КОН – количественная оценка неопределённости

КОР – количественная оценка аварийного риска

ЛВМ – логико-вероятностное моделирование

ЛПР – лица, принимающие решения

МАГАТЭ (IAEA) – Международное агентство по атомной энергии

МКРЗ – Международная комиссия по радиологической защите

МоН – модельная неопределенность

МОТ – Международная организация труда  
МПС – минимальное проходное сечение  
НКПР – нижний концентрационный предел воспламенения (распространения пламени)  
НМД – нормативно-методический документ  
ОБУВ – ориентировочно безопасный уровень воздействия вещества  
ОДУ – обыкновенное дифференциальное уравнение  
ООН – Организация объединенных наций  
ОПО – опасный производственный объект  
ОШ – огненный шар  
ПаН – параметрическая неопределенность  
ПДК – предельно допустимая концентрация вещества  
РБ – Руководство по безопасности  
РНОАР – Российское научное общество анализа риска  
СМР – строительно-монтажные работы  
СНЛАУ – система нелинейных алгебраических уравнений  
СОППЖ – средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни  
СПГ – сжиженный природный газ  
ССЖ – средняя стоимость жизни человека  
СУГ – сжиженный углеводородный газ  
ТВС – топливовоздушная смесь  
УВ – условная вероятность события  
УПВС – укрупненные показатели восстановительной стоимости  
УПРЗА – унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы  
ЧС – чрезвычайная ситуация  
AIChE – Американское общество инженеров-химиков (США)  
ANS – Американское ядерное общество (США)  
ANSI – Американский национальный институт стандартов (США)  
API – Американский нефтяной институт (США)  
ASME – Американское общество инженеров-механиков (США)  
CDF – частота событий, чреватых ущербом для активной зоны реактора  
CCPS – Центр безопасности химических процессов (США)

- EPRI – Институт изучения электроэнергетики (США)
- EF – фактор ошибки
- ETA – анализ деревьев событий
- FTA – анализ деревьев отказов
- HSE – Управление по охране здоровья и промышленной безопасности (Великобритания)
- IPCS – Международная программа химической безопасности (ВОЗ, МОТ, UNEP)
- NASA – Американское агентство по авиации и исследованию космического пространства (США)
- QRA – количественная оценка риска (аналог КОР)
- PRA – вероятностная оценка риска (аналог ЛВМ)
- SOKC – State-Of-Knowledge-Correlation
- TNO – Организация прикладных исследований (Нидерланды)
- UF – фактор неопределенности
- UNEP – Программа защиты окружающей среды ООН
- UQ – количественная оценка неопределенности (аналог КОИ)
- US AEA – Американское агентство по атомной энергии (США)
- US FDA – Американское агентство по пище и лекарствам (США)
- US EPA – Американское агентство по защите окружающей среды (США)
- US NRC – Американский национальный исследовательский комитет (США)
- U.S. NRC – Американская комиссия регулирования ядерной безопасности (США)
- US OSHA – Американское агентство профессиональной безопасности и здоровья (США)

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

**аффинное представление интервального числа  $x$ :** Линейная форма

$$x = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \varepsilon_i,$$

где  $a_i \in \mathbb{R}$  (действительные числа),  $i = 0, 1, \dots, n$ ;

$\varepsilon_i$  – "коэффициенты шума", случайные числа из единичного интервала,  $\varepsilon_i \in [-1, 1]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

**брус:** Подмножество  $\mathbb{R}^n$ , которое является декартовым произведением  $n$  интервалов;

**валидация математической модели:** Процесс оценивания соответствия модели заявленным требованиям, сравнение результатов расчета с внешними параметрами (например, экспериментальными данными);

**верификация математической модели:** Процесс оценивания внутренней правильности, непротиворечивости модели;

**головное событие графа:** Событие, для которого исследуются предпосылки (в дереве отказов) и последствия (в дереве событий);

**дендрограмма:** Древовидная структура, графическое изображение связей между исходными и последующими событиями. Разновидностями дендрограммы являются:

**дерево отказов:** Дендрограмма, построенная на обратной логике. Используется для исследования событий, предшествующих головному событию графа. События графа связаны с помощью логических операторов И и ИЛИ;

**дерево событий:** Дендрограмма, построенная на прямой логике. Используется для исследования событий, наступающих после реализации головного события;

**типа "галстук-бабочка" (ДГБ):** Дендрограмма, являющаяся объединением двух графов: дерева отказов (левая часть ДГБ) и дерева событий (правая часть), в центре ДГБ расположено головное событие;

**интервал (интервальное число):** Замкнутый отрезок вещественной оси, [130];

**интервальный анализ:** Отрасль математического знания, исследующая задачи с интервальными неопределенностями и методы их решения, [130];

**интервальная неопределенность:** Состояние неполного (частичного) знания об интересующей нас величине, когда известна лишь ее принадлежность некоторому интервалу, [130];

**интервальная оболочка** интервального вектора  $s$ : Наименьший по включению интервальный вектор (или матрица), содержащий  $s$ , где  $s$  – непустое ограниченное множество в  $\mathbb{R}^n$  или  $\mathbb{R}^{m \times n}$ , [130];

**консервативный подход к оценке риска:** Подход, при котором величинам входных параметров модели присваиваются максимально (или минимально) – в зависимости от влияния на величину целевой метрик сценария – возможные значения;

**логико-вероятностное моделирование (ЛВМ):** Использование функций алгебры логики для аналитической записи условий наступления интересующего события и оценке его вероятности;

**метод Рамона Мура:** Метод выполнения интервальных вычислений, при котором интервалы входных параметров разбиваются на множество подинтервалов, расчеты выполняются для всех подинтервалов отдельно, в качестве результата принимается интервальная оболочка полученного множества результатов-подинтервалов;

**метод оптимизации функции:** Задача нахождения экстремумов целевой функции в некоторой заданной области;

**метод глобальной оптимизации:** Метод поиска абсолютного максимума и минимума целевой функции на всей следуемой области;

**метрика:** Численный параметр, используемый для сравнения альтернатив в целях обоснования принятия управленческих решений;

**метрика аварийного риска:** Численный параметр, используемый в рамках риск-ориентированного подхода для сравнения альтернативных решений при управлении промышленной безопасностью. Метрика аварийного риска должна учитывать одновременно величину полного ущерба прогнозируемой аварии и вероятность его нанесения для всех возможных сценариев возникновения и развития аварии;

**метрика сценария аварии:** Величина поражающего фактора данного аварийного сценария;

**мультиинтервал:** Объединение двух и более непересекающихся интервалов;

**неопределенность:** Понятие, характеризующее недостаточность информации о ситуации, либо величине параметра. Первое определяет качественный аспект неопределенности, второе – ее количественный аспект. Полная информированность означает полную детерминированность и характеризуется нулевой неопределенностью. Параметрическая неопределенность означает, что величина параметра точно неизвестна из-за того, что она либо объективно варьирует со временем, либо точные данные о ее величине отсутствуют. В общем случае параметрическая неопределенность может быть задана интервалом (диапазоном) значений, который может быть обоснованно приписан величине параметра. При наличии достаточных оснований эта величина может быть задана распределением вероятности в пределах данного интервала, либо – функцией принадлежности. От неопределенности следует отличать ошибки – приписывание величине

параметра неверного значения, введение в модель неверных факторов и т.д. Отличие заключается именно в наличии информации о верном значении величины параметра;

**полиномальный хаос:** Предложенный Норбертом Винером метод описания неопределенности вероятностного типа в динамических системах. В зависимости от постулируемого типа распределения вероятности использует различные полиномы: для нормального типа – полиномы Эрмита, равномерного распределения – полиномы Лежандра;

**типы неопределенности аварийного риска:**

**вычислительный:** Дополнительная неопределенность (уширение интервала результата вычислений), обязанная используемым расчетным методам;

**модельный:** Неопределенность, обусловленная альтернативностью верифицированных моделей, используемых для описания аварийных процессов;

**параметрический:** Неопределенность, возникающая из-за отсутствия сведений о точной величине параметра;

**терминологический (коммуникативный):** Неопределенность, проистекающая из-за различного толкования специалистами одного и того же термина;

**подтипы модельной неопределенности:**

- **сценарный:** Неопределенность, возникающая из-за использования в рамках ЛВМ аварии альтернативных наборов ее сценариев, рекомендуемых различными Руководствами по КОР;

- **концептуальный:** Неопределенность, обусловленная использованием для моделирования аварийных процессов альтернативных физических концепций (например, положений молекулярной или турбулентной диффузии);

- **аппроксимационный:** Неопределенность, генерируемая при использовании в физико-математических моделях аварийных процессов альтернативных численных значений параметров, учете или неучете в модели некоторых факторов и т.д.;

**подтипы параметрической неопределенности:**

- **вариативный:** Объективная неопределенность, вызванная изменениями величины параметра со временем;

- **модельный:** Субъективная неопределенность, обязанная недостаточной информацией об истинной величине параметра модели;

- **смешанного типа:** Неопределенность, обусловленная объективными и субъективными факторами одновременно.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Акимов, В.А. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски / В. А. Акимов, В. Д. Новиков, Н. Н. Радаев – М. : ЗАО ФИД Деловой экспресс, 2001. – 345 с.
- 2 Акимов, В.А. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В. А. Акимов, В. В. Лесных В. В., Н. Н. Радаев Н.Н. – М. : Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
- 3 Ахметов, С. А. Моделирование и инженерные расчеты физико-химических свойств углеводородных систем: учеб. пособие / С. А. Ахметов, А. Р. Гайсина. – СПб. : Недра, 2010. – 128 с.
- 4 Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблемы безопасности : В 4-х частях. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности : науч. рук. К. В. Фролов. – М. : МГФ "Знание", 2006. – 640 с.
- 5 Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / П. Г. Белов. – М. : Издательский центр "Академия", 2003. – 512 с.
- 6 Белов, П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование. / П. Г. Белов – М. : Юрайт, 2014 – 728 с.
- 7 Беспалова, О.В. Отличительные особенности "неопределенность", "риск" / О. В. Беспалова // Пожарная безопасность : проблемы и перспективы. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 84 – 86.
- 8 Богоявленский, С.Б. Теоретические и практические аспекты принятия решений в условиях неопределенности и риска : уч. пособие / С. Б. Богоявленский – СПб : Издательство СПбГЭУ, 2014. – 119 с.
- 9 Бушуев, А.Ю. Проектирование тросовой системы раскрытия многозвенной конструкции солнечной батареи в условиях неопределенности / А. Ю. Бушуев //Инженерный журнал : наука и инновации. – 2017. – № 1. – С. 1 – 11.
- 10 Бушуев, Н.С. Учет неопределенности исходной информации в математических моделях пассажиропотока высокоскоростной железнодорожной магистрали / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сборник научных трудов. –Хабаровск, 2015. – С. 104 – 109.
- 11 Быков, А.А. О методологии экономической оценки жизни среднестатистического человека / А. А. Быков // Проблемы анализа риска. – 2007. – том 4. – № 2 – С. 178 – 191.
- 12 Быков, А.А. К проблеме оценки социально-экономического ущерба с использованием показателя цены риска / А. А. Быков, М. И. Фалеев // Проблемы анализа риска. – 2005. – том 2. – № 2. – С. 114 – 131.

- 13 Варграфтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варграфтик – М. : Наука, 1972 – 720 с.
- 14 Востоков, В.Ю. К вопросу определения экономического эквивалента стоимости жизни среднестатистического человека / В. Ю. Востоков, Я. В. Минаева, Ю. К. Чянавичус // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2011. – вып.1. – С. 38 – 49.
- 15 Горский, В.Г. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска – / В. Г. Горский, Г. А. Монин, В А Петрунин и др. – М. : Экономика, 2002. – 260 с.
- 16 ГОСТ 12.1.004–91. Межгосударственный стандарт. Пожарная безопасность. Общие требования. – Введ. 1992–07–01. – М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1996. – 105 с.
- 17 ГОСТ 12.1.044–89. Межгосударственный стандарт. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – Введ. 1991–01–01. – М. : Стандартиформ, 2006. – 99 с.
- 18 ГОСТ 17032-2010. Резервуары горизонтальные стальные для нефтепродуктов. Технические условия. – Введ. 2012–01–01. – М. : Стандартиформ, 2011. – 16 с.
- 19 ГОСТ 27540-87. Сигнализаторы горючих газов и паров термохимические. Общие технические условия. – Введ. 1989–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 35 с.
- 20 ГОСТ 27578-87. Газы углеводородные сжиженные для автомобильного транспорта. Технические условия. – Введ. 1989–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 8 с.
- 21 ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – Введ. 1982–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 180 с.
- 22 ГОСТ 51866-2002. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. – Введ. 2002–07–01. – М. : Стандартиформ, 2009. – 23 с.
- 23 ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – Введ. 2014–01–01. – М. : Стандартиформ, 2014. – 62 с.
- 24 ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – Введ. 2000–01–01. – М. : Издательство стандартов, 1998. – 89 с.
- 25 ГОСТ Р 51105-97. Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Неэтилированный бензин. Технические условия. – Введ. 1998–07–01. – М. : Издательство стандартов, 1998. – 23 с.
- 26 ГОСТ Р 51901.1-2002 (2005). Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. – Введ. 2003–09–01. – М. : Издательство стандартов, 2002. – 28 с.
- 27 ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – Введ. 2005–09–01. – М. : Стандартиформ, 2005. – 16 с.

- 28 ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. Руководство по применению методов анализа надежности. – Введ. 2006–02–01. – М. : Стандартиформ, 2005. – 49 с.
- 29 ГОСТ Р 52087-2003. Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия. – Введ. 2004–04–01. – М. : Издательство стандартов, 2003. – 11 с.
- 30 Гражданкин, А.И. Допустимый риск – мера неприемлемой опасности промышленной аварии / А. И. Гражданкин, А. С. Печеркин, В. И. Сидоров // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 3. – С. 66 – 70.
- 31 Дегтярев, Д.В. Количественный анализ риска при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений / Д. В. Дегтярев, М. В. Лисанов, А. А. Швыряев. // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 6. – С. 82 – 89.
- 32 Декларация Российского научного общества анализа риска "Об оценке стоимости среднестатистической жизни человека" // Проблемы анализа риска. – 2007. – том 4. – № 2. – С. 177.
- 33 Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций : утв. МЧС РФ 01.12.004 г. – М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004. – 141 с.
- 34 Елохин, А.Н. Анализ и управление риском : теория и практика / А. Н. Елохин – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ООО "Полимедиа", 2002. – 192 с.
- 35 Еремина, Т.В. Применение теории нечетких множеств к построению моделей риска электроустановок / Т. В. Еремина, А. Ф. Калинин, А. Ф. Костюков, Г. А. Гончаренко // Вестник Восточно-Сибирского государственного управления технологий и управления. – 2015. – том 55. – № 4. – С. 9 – 13.
- 36 Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
- 37 Кауфман, Б.Д. Оценка надежности гидротехнических сооружений при динамических воздействиях в условиях неполноты исходной информации : дисс. ... док. техн. наук : 05.23.07 : защищена 13.11.2015 : утв. 31.03.2016. Кауфман Борис Давидович. – СПб, 2015. – 257 с.
- 38 Ковалевич, О.М. Риск в техногенной сфере / О. М. Ковалевич – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 152 с.
- 39 Козлитин, П.А. Теоретические основы и методы системного анализа промышленной безопасности объектов теплоэнергетики с учетом риска / П. А. Козлитин – Саратов : Сарат. гос. тех. ун-т, 2009. – 156 с.
- 40 Колесников, Е.Ю. Анализ техногенного риска: проблемы и неопределенности / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2013. – Том 10. – № 5. – С. 14 – 21.

- 41 Колесников, Е.Ю. К расчету массовой скорости испарения опасных веществ / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2011. – том 8. – № 5. – С. 84 – 91.
- 42 Колесников, Е.Ю. Качественный анализ неопределенности аварийного риска взрыва типа BLEVE / Е. Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 4. – С.62 – 69.
- 43 Колесников, Е.Ю. Качественный анализ неопределенности пожарного риска. Сценарий аварии "Пожар пролива растворителя" / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2014. – том 11. – № 1. – С. 74 – 91.
- 44 Колесников, Е.Ю. Количественная оценка аварийного риска: анализ неопределенности / Е. Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 2. – С. 64 – 70.
- 45 Колесников, Е.Ю. Количественная оценка аварийного риска: оценка параметрической чувствительности моделей и консервативности принятых допущений / Е. Ю. Колесников, Э. Ш. Теляков // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 3. – С. 63 – 67.
- 46 Колесников, Е.Ю. Количественная оценка неопределенности аварийного риска. Сценарий аварии "Длительное испарение пролива" / Е. Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 8. – С.78 – 84.
- 47 Колесников, Е.Ю. Количественная оценка неопределенности пожарного риска. Сценарий аварии "Пожар пролива ЛВЖ" / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2014. – том 11. – № 4. – С. 52 – 66.
- 48 Колесников, Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Часть 1 / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2013. – том 10. – № 2. – С. 48 – 71.
- 49 Колесников, Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Часть 2 / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2013. – том 10. – № 3. – С. 8 – 31.
- 50 Колесников, Е.Ю. О модельной неопределенности пожарного риска наземного резервуара с бензином / Е. Ю. Колесников // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Том 22. – № 3. – С.38 – 46.
- 51 Колесников, Е.Ю. О нормировании интервальных значений аварийного риска (риска ЧС) / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2016. – том 13. – № 2. – С. 66 – 71.
- 52 Колесников, Е.Ю. Об оценке неопределенности результатов анализа техногенного риска / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2012. – том 9. – № 4. – С. 8 – 46.
- 53 Колесников, Е.Ю. Способы количественной оценки неопределенности параметров техногенного риска / Е. Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 1. – С. 56 – 67.

54 Колесников, Е.Ю. Терминологическая неопределенность: опыт количественной оценки // Е. Ю. Колесников, Э. Ш. Теляков // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 7. – С.82 – 88.

55 Кондрашова, О.Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров / О. Г.Кондрашова, М. Н. Назарова // Нефтегазовое дело. – 2004. – № 2. URL: <http://www.ogbus.ru> (дата обращения 29.12.2017).

56 Костогрызлов, А.И. Технологии вероятностного моделирования с повышенной точностью прогнозирования рисков для анализа комплексной безопасности сложных систем и обоснование упреждающих мер эффективного управления в условиях разнородных угроз. В книге "Глобальная и национальная стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий". XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Материалы конференции 19-21 мая 2015 года – М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. – С. 68 – 74.

57 Лисанов, М.В. О регулировании промышленной безопасности по количественным критериям допустимого риска / М. В. Лисанов, Е. В. Ханин, С. И. Сумской // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 54 – 62.

58 Маршалл, В. Основные опасности химических производств: Пер. с англ. / В. Маршалл – М. : Мир, 1989. – 672 с.

59 Мацак, В.Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве / В. Г. Мацак, Л. К. Хоцянов – М. : Медгиз, 1959. – 232 с.

60 Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды : утв. Минприроды России 08.07.2010 (в ред. от 25.04.2014). URL <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2072837> (дата обращения 6.05.2013).

61 Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. МЧС России 10.07.2009 (в редакции приказа МЧС России от 14.12.2010 № 649 "О внесении изменений в приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404"). URL <https://www.base.garant.ru/196118> (дата обращения 11.02.2013).

62 Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках : утв. Госкомприроды России 8.04 1998. URL <https://www.base.garant.ru/2163005/62ca3c9aac147338fa0b5683> (дата обращения 11.02.2013).

63 Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при свободном горении нефти и нефтепродуктов : утв. Самарским облкомприроды 09.08.1996. URL <https://www.meganorm/index2/1/4293782/4293782> (дата обращения 11.02.2013).

64 Мискевич, А.Б. Нарастающий риск, нелинейность, сложность и неопределенность в расширении пространства случайных событий / А. Б. Мискевич, Л. Р. Шамшур // Современные инновационные технологии и проблемы устойчивого развития общества.

Сб. научных статей участников X международной научно-практической конференции. – М. : Издательский дом "Ковчег", 2017. – С. 188 – 189.

65 МУК 2.6.1.1194-03 Методические указания. Радиационный контроль. Стронций-90 и цезий-137. Пищевые продукты. Отбор проб, анализ и гигиеническая оценка. – Введ. 2003–05–01. – М. : Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 31 с.

66 Найт, Ф.Х. Риск, неопределенность, прибыль / Ф. Х. Найт – М. : Издательство "Дело", 2003. – 360 с.

67 Николаенко, О.В. Совершенствование основ и процессов проектирования, строительства и эксплуатации производств переработки нефти и газа, нефтехимии и газохимии через изменение в регулировании промышленной безопасности / О. В. Николаенко, А. Н. Черноплеков, И. А. Заикин и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 4. – С. 44 – 51.

68 Оптимизация радиационной защиты на основе анализа соотношения затраты-выгода. Международная комиссия по радиологической защите. Публикация № 37 – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 95 с.

69 Острейковский, В.А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев – М. : Физматлит, 2008. – 352 с.

70 Печеркин, А.С. Тенденции применения количественной оценки риска пожара и аварии в российском законодательстве. Отказ от "рискованной" альтернативы / А. С. Печеркин // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 50 – 54.

71 Письмо Координационного центра по ценообразованию и сметному нормированию в строительстве от 14.12.2017 № КЦ/2017-12ти "Об индексах изменения сметной стоимости строительства по Федеральным округам и регионам Российской Федерации на декабрь 2017 года". URL <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71749444> (дата обращения 6.05.2013).

72 Письмо Минприроды России от 27.12.1993 № 04-25/61-5678 "О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами". URL <https://www.garant.ru/2107925> (дата обращения 6.05.2013).

73 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд. : в 2-х книгах; кн. 1 / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. – М. : Химия, 1990. – 496 с.

74 Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов. – М : ВНИИПО, 2012. – 242 с.

75 Пособие по применению СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности – М. : ВНИИПО, 2014. –147 с.

76 Постановление Госстроя СССР от 11.05.1983 № 94 об утверждении индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ и территориальных коэффициентов к ним для пересчета сводных сметных расчетов (сводных смет) строек. URL [https://www.libussr.ru/doc\\_ussr/usr\\_11553.htm](https://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_11553.htm) (дата обращения 6.05.2013).

77 Постановление Правительства РФ от 12.11.2012 № 1164 (в ред. ПП РФ от 21.02.2015 г. № 150) "Об утверждении правил расчета суммы страхового возмещения при причинении вреда здоровью потерпевшего" // Российская газета. – 2012. – 21 нояб. – С. 19.

78 Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 № 913 (ред. от 09.12.2017) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах". URL <https://www/publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201609150007> (дата обращения 3.06.2018).

79 Постановление Правительства РФ от 17.08.2016 № 806 "О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты правительства Российской Федерации". URL <https://www.mchs.gov.ru/dokumenty/468> (дата обращения 10.11.2017).

80 Постановление Правительства РФ от 3 марта 2017 № 255 "Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду". URL <https://www.base.garant.ru/7164748> (дата обращения 11.02.2013).

81 Правила перевозок жидких грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств- участников Содружества 21.05.2009. URL <https://mintrans.ru/documents/7/826> (дата обращения 16.05.2018).

82 Р 50.1.060-2006 Статистические методы. Руководство по использованию оценок повторяемости, воспроизводимости и правильности при оценке неопределенности измерений – Введ. 2006–12–19. – М. : Стандартинформ, 2006. – 28 с.

83 Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов : руководство. – М. : ВНИИПО, 2002. – 77 с.

84 РД 03-496-02 Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах : утв. Госгортехнадзором России 29.10.2002 – М. : ГУП "Научно-технический центр по безопасности в промышленности" Госгортехнадзора России, 2002.– 38 с.

85 РД 08-120-96 Методические указания по проведению анализа риска опасных промышленных объектов : утв. Госгортехнадзором России 12.06.1996. – М. : ГУП "Научно-технический центр по безопасности в промышленности" Госгортехнадзора России, 1996.– 15 с.

86 РД 24-207-06-90 Арматура трубопроводная. Расчет показателей надежности на этапе проектирования. : утв. Минтяжмашем СССР 20.09.1990. – М. : ЦКБА, 1990.– 104 с.

87 Ренн, Ортвинн. Три десятилетия исследования риска: достижения и новые горизонты / Ортвинн Ренн // Вопросы анализа риска. – 1999. – Том 1. – № 1. – С. 80 – 99.

88 Руководство по безопасности "Методика анализа риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазодобычи" : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 17.08.2015. – Сер. 08. – Вып. 28. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – 53 с.

89 Руководство по безопасности "Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ" : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 20.04.2015. – Сер. 27. – Вып. 11. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – 103 с.

90 Руководство по безопасности "Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей" : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 20.04.2015. – Сер. 27. – Вып. 09. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 25 с.

91 Руководство по безопасности "Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных жидкостей" : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 17.09.2015. – Сер. 27. – Вып. 12. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 52 с.

92 Руководство по безопасности "Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных газов" : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 17.09.2015. – Сер. 27. – Вып. 10. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 48 с.

93 Руководство по безопасности "Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах" : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 11.04.2016. – Сер. 27. – Вып. 16. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 55 с.

94 Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 26.12.2012 г. – Сер. 03. – Вып. 69. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 240 с.

95 Руководство по безопасности для нефтебаз и складов нефтепродуктов : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 26.12.2012. – Сер. 09. – Вып. 33. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 55 с.

96 Руководство по выражению неопределенности измерений – СПб : ОНТИ ГП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева". Перевод с англ. Научный редактор проф. Слаев В.А., 1999. – 135 с.

97 Сафонов, В.С. Методические основы проведения анализа риска для магистральных газопроводов : учебное пособие/ В. С. Сафонов, А. В. Мельников. П. П. Кукин – М. : МАТИ, 2010. – 225 с.

98 Сафонов, В.С. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности / В. С. Сафонов, Г. Э. Одишария, А. А. Швыряев – М. : НУМЦ Минприроды России, 1996. – 208 с.

99 Сборники укрупненных показателей восстановительной стоимости зданий и сооружений для переоценки основных фондов, по состоянию на 1 января 1972 г. Сборник № 4. Здания и сооружения нефтяной промышленности. Отдел IV. Хранение нефтепродуктов (нефтебазы). Насосная для слива темных нефтепродуктов из железнодорожных цистерн. – М. : Стройиздат, 1972. – 171 с.

100 Семенов, К.К. Достоверность результатов применения метода Монте-Карло в задачах интервального анализа / К. К. Семенов // Вычислительные технологии. – 2016. – Том 21. – № 2. – С.42 – 52.

101 Сивухин, Д.В. Курс общей физики в 5-ти тт. Изд. второе, испр. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин – М. : Наука, 1979. – 552 с.

102 Смоляк, С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов условиях риска и неопределенности. Теория ожидаемого эффекта / С. А. Смоляк – М. : Наука, 2002. –182 с.

103 СНиП II-3-79\* Строительная теплотехника : строит. нормы и правила : утв. Госстроем СССР 14.03.1979. – Введ. 1979–07–01. – М. : Центральный институт типового проектирования, 1986. – 33 с.

104 СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : свод правил : утв. Мин-вом России по делам гражд. обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий 25.03.2009. – Введ. 2009–05–01. – М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – 35 с.

105 СП 131.13330.2012 Строительная климатология и геофизика : свод правил : утв. Минрегион России 30.06.2012. – Введ. 2013–01–01. – М. : Минрегион России, 2012. – 113 с.

106 Стекольников, М. Н. Углеводородные растворители: Свойства, производство, применение: Справочное изд. / М. Н. Стекольников – М. : Химия, 1986. – 119 с.

107 СТО Газпром 2-2.3-400–2009 Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО "Газпром" : стандарт организации : утв. ОАО "Газпром" 2009–10–05. – Введ. 2010–01–01. – М. : ООО "ИРЦ Газпром", 2009. – 333 с.

108 СТО Газпром 2-3.5.051–2006 Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов : стандарт организации : утв. ОАО "Газпром" 2005–12–30. –Введ. 2006–06–03. – М. : ООО "ИРЦ Газпром", 2009. – 196 с.

109 СТО Газпром 3.3–2–024–2011 Методика нормирования расхода природного газа на собственные технологические нужды и технологические потери магистрального

транспорта газа : стандарт организации : утв. ОАО "Газпром" 2011–12–06. – Введ. 2012–12–05. – М. : ООО "ИРЦ Газпром", 2012. – 67 с.

110 Таблицы физических величин : справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.

111 Трошин, Д.В. Безопасность предприятия: смысл, онтология, оценка : монография / Д. В. Трошин – Тверь : Твер. гос. университет, 2015. – 212 с.

112 Трунов, И.Л. Эквивалент стоимости человеческой жизни / И. Л. Трунов, Л. К. Айвар, Г. Х. Харисов // Представительная власть – XXI век : законодательство, комментарии, проблемы. – 2006. – № 3 (69) . – С. 24 – 29.

113 Управление риском в социально-экономических системах: концепция и методы реализации / Объединенный комитет по управлению риском ГКНТП // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1995. – вып. 11 и 12.

114 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств" : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 11.03.2013. – Сер. 09. – Вып. 37. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 126 с.

115 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности автогазозаправочных станций газомоторного топлива" : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 11.12.2014. – Сер. 12. – Вып. 15. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – 60 с.

116 Федеральный закон "Об охране окружающей природной среды" от 10.01.2002 № 7-ФЗ // Российская газета. – 2002. – 12 янв. С. 12 – 14.

117 Федеральный закон "О внесении изменений в Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 10.07.2012 № 117-ФЗ // Российская газета. – 2012. – 13 июл. С. 18.

118 Федеральный закон "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.1997 № 116-ФЗ – М. : Норматика, 2018. – 28 с.

119 Федеральный закон "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" от 21.12.1994 № 68-ФЗ – М. : Норматика, 2014. – 20 с.

120 Федеральный Закон "Технический регламент "О требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 № 123-ФЗ – Екатеринбург : УралЮрИздат, 2018. – 132 с.

121 Федеральный закон "О безопасности гидротехнических сооружений" от 23.06.1997 № 117-ФЗ – М. : НКПРОМ, 2018. – 36 с.

122 Федеральный закон (в ред. от 03.07.2016 г.) "О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля

(надзора) и муниципального контроля от 26.12.2008 № 294-ФЗ // Российская газета. – 2008. – 30 дек. С. 4.

123 Федеральный закон (ред. 23.06.2016) " Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте" от 27.07.2010 № 225-ФЗ // Российская газета. – 2010. – 2 авг. С. 12.

124 Федеральный закон "О радиационной безопасности населения" от 9.01.1996 № 3-ФЗ – М. : Технорматив, 2015. – 12 с.

125 Физическая энциклопедия в 5-ти тт. Т. 1. /гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич и др. – М. : Советская энциклопедия, 1988. –704 с.

126 Физическая энциклопедия в 5-ти тт. Т. 4. /гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич и др. – М. : Советская энциклопедия, 1994. –701 с.

127 Физические величины: справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. / Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. –1232 с.

128 Хансен, Элдон. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа / Элдон Хансен, Дж. Уильям Уолтер – Москва-Ижевск : НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2010. – 508 с.

129 Химическая энциклопедия в 5-ти тт. Т. 1. / Ред. колл. И. Л. Кнунянц (гл. ред) и др. – М. : Сов. Энциклопедия, 1988 – 623 с.

130 Шарый, С.П. Конечномерный интервальный анализ (2017) URL: <http://www.nsc.ru/interval> (дата обращения: 05.01.2018).

131 Шебеко, Ю.Н. Расчет влияния обвалования на растекание горючей жидкости при разрушении резервуара / Ю. Н. Шебеко, А. П. Шевчук, И. М. Смолин // Химическая промышленность. – 1994. – № 4. – С. – 230 – 233.

132 Якуш С.Е. Гидродинамика и горение газовых и двухфазных выбросов в открытой атмосфере : дисс. ... док. физ.-мат. наук : 01.02.05 : защищена 01.06.2000 : утв. 13.02.2001. Якуш Сергей Евгеньевич. – М., 2000 – 337 с.

133 Abrahamsson, Marcus. Treatment of Uncertainty in Risk Based Regulations and Standards for Risk Analysis. Report 3114 / Marcus Abrahamsson – Lund, Lund university, 2000 – 84 p.

134 Abrahamsson, Marcus. Uncertainty in Quantitative Risk Analysis : characterisation and Methods of Treatment. – Report 1024 / Marcus Abrahamsson – Lund, Lund University, 2002. – 115 p.

135 Agarwal, Harish. Uncertainty quantification using evidence theory in multidisciplinary design optimization / Harish Agarwal, John E. Renaud, L. Evan et. al. // Reliability Engineering and System Safety. – 2004. – Vol. 85. – pp. 281 – 294.

136 Arunraj, N.S. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation / N. S. Arunraj, Saptarshi Mandal, J. Maiti // Accident Analysis and Prevention. – 2013. – Vol. 55. – pp. 242 – 255.

137 ASME/ANS RA-Sa-2009. Addenda to ASME/ANS RA-S-2008 Standard for Level 1/ Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications – 352 p.

138 Athearn, J.L. Risk and Insurance. 2-nd ed. / J. L. Athearn –New York : Appleton-Century-Croft, 1969. – 234 p.

139 Bedford, Thomas. Probabilistic Risk Analysis / Thomas Bedford, Rodger Cooke – Cambridge : Cambridge University Press, 2001. – 394 p.

140 Beer, Michael. Imprecise probabilities in engineering analyses / Michael Beer, Scott Ferson, Vladik Kreinovich // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 37. – pp. 4 – 29.

141 Britter, R.E. Workshop on the dispersion of dense gases / R. E. Britter, J. McQuaid. // HSE Contract Research Report № 17, 1988. – 188 p.

142 Brown, S.G. Methods for estimating uncertainty in PMF solutions : examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting PMF results / Steven G. Brown, Shelly Eberly, Pentti Paatero, Gary A Norris // Science of the Total Environment. – 2015. – Vol. 518 – 519. – pp. 626 – 635.

143 Clausewitz, Karl. Vom Krieg, 1832 (русский перевод: Клаузевиц К. О войне / К. Клаузевиц – М. : Госвоениздат, 1934. – 682 с.).

144 Cooke, Rodger M. Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science / Rodger M. Cooke – New York : Oxford University Press, 1991. – 334 p.

145 Council directive 82/501/EEC On the major-accident hazards of certain industrial activities. ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/1982/501/oj> (дата обращения 20.01.2013).

146 COVO Steering Committee, Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area. A Pilot Study – Reidel, 1982. – 199 p.

147 CPR-12E Methods for determining and processing probabilities (Red book). 3-nd ed. – Hague : VROM, 2005. – 604 p.

148 CPR-14E Methods for the calculation of Physical Effects (Yellow book). 3-rd. ed. – Hague : VROM, 2005. – 870 p.

149 CPR-16E Methods for determination of possible damage to people and objects resulting from releases hazardous materials (Green book). –Voorburg, 1989. – 337 p.

- 150 CPR-18E Guidelines for quantitative risk assessment (Purple book). 2-nd ed. – Hague : VROM, 2005. – 237 p.
- 151 Crowe, C.T. Engineering Fluid Mechanics, 9-th ed. / C. T. Crowe, D. F. Elger, B. C. Williams et. al. – New York : J. Wiley and Sons, 2010. – 1033 p.
- 152 Crowe, R.M. The meaning of risk / R. M. Crowe, R. C. Horn // J. Risk Insurance. – 1967. – Vol. 34 (3). – pp. 459 – 474.
- 153 Daneshkhah, A.R. Uncertainty in probabilistic risk assessment : a review / A. R. Daneshkhah, 2004. – 15 p.
- 154 Delbecq, A. Group Techniques for Program Planning / A. Delbecq, van de Ven, et. al. – Scott, Foresman, Glenview, Ill., 1975. – 87 p.
- 155 Draft guidance document on characterizing and communicating uncertainty in exposure assessment. – IPCS, World health organization, 2006. – 333 p.
- 156 Eckhard, R. John von Neumann and the Monte Carlo method / R. Eckhard, Stanislav Ulam. – Los Alamos Science. – 1987. – Vol. 15. – pp. 44 – 51.
- 157 Eisenberg, N. A. CG-D-136-75 and NTIS AD-015-245 : Vulnerability Model : A Simulation System for Assessing Damage Resulting From Marine Spills / N. A. Eisenberg, C. J. Lynch, R. J. Breeding – US Coast Guard, 1975.
- 158 Environmental Program of the Netherlands 1986 – 1990, production and distribution by the Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, Department of Information and International Relations. 85902/12-85.4078/92. – Hague : VROM, 1985.
- 159 Feinberg, Jonathan. Chaospy : an open source tool for designing methods of uncertainty quantification / Jonathan Feinberg, Hans Petter Langtangen // Journal of Computational Science. – 2015. – Vol. 11. – pp. 46 – 57.
- 160 Ferson, Scott. Different methods are needed to propagate ignorance and variability / Scott Ferson, Lev R. Ginzburg // Reliability Engineering and System Safety. – 1996. – Vol. 54. – pp. 133 – 144.
- 161 Finkel Adam. Confronting uncertainty in risk management: A guide for decision-makers: report / Adam Finkel. – Washington D.C. : Center for risk management, 1990. – 83 p.
- 162 Finney, D.J. Probit Analysis. 3-rd ed. / D. J. Finney – London : Cambridge University Press, 1971. – 255 p.
- 163 Frantzych, Hakan. Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering / Hakan Frantzych. – Lund, Lund university, 1998. – 208 p.
- 164 French, S. Fuzzy Decision Analysis, Some Problems / S. French, Zimmermann, H., Zadeh, L., and Gains (eds.) Fuzzy Sets and Decision Analysis – Elsevier North-Holland, Amsterdam, 1984.
- 165 French S. Fuzzy Sets : The Unanswered Questions / S. French – Manchester-Sheffield School of Probability and Statistics. – Research Report, November 1987.

- 166 Glasstone, S. The effects of nuclear weapons / S. Glasstone – US Atomic Energy Commission, 1967.
- 167 Goodwin, N. Bridging the Gap Between Deterministic and Probabilistic Uncertainty Quantification Using Advanced Proxy Based Methods SPE-173301 : A Report – MS, 2015. – 73 p.
- 168 Greenspan, H.P. Flow over a containment dyke / H. P. Greenspan, R. E. Young // Journal of Fluid Mechanics. – 1978. – Vol. 87, part 1. – pp. 179 – 192.
- 169 Guest Editorial : alternative representations of epistemic uncertainty // Reliability Engineering and System Safety. – 2004. Vol. 85. – pp. 1 – 10.
- 170 Guest editorial : treatment of aleatory and epistemic uncertainty in performance assessments for complex systems // Reliability Engineering and System Safety. – 1996. – Vol. 54. – pp. 91 – 94.
- 171 Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement. ISO, 1-st ed. – Genève, 1993. – 105 p.
- 172 Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis – New York : American Institute of Chemical Engineers, 1989.
- 173 Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. 2-nd. ed. AIChE/CCPS, 2000. – 744 p.
- 174 Guidelines for developing quantitative safety risk criteria. Center for Chemical Process Safety – New York : John Wiley & Sons, 2009 – 250 p.
- 175 Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVES – New York : American Institute of Chemical Engineers, 1994. – 402 p.
- 176 Gustafson, D. A comparative study of differences in subjective likelihood estimates made by individuals, interacting groups, Delphi Groups, and Nominal Groups / D. Gustafson, R. Shulka, A. Delbecq et. al. // Organizational Behaviour and Human Performance. – 1973. – Vol. 9. – pp. 280 – 291.
- 177 High, R.W. The Saturn fireball / R. W. High // Annals New York Academy of Sciences. – 1968. – Vol. 152, Part 1. – pp. 441 – 451.
- 178 Hofer, Eduard. When to separate uncertainties and when not / Eduard Hofer // Reliability Engineering and System Safety. – 1996. – Vol. 54. – pp. 113 – 118.
- 179 Holden, P.L. Fragment Hazards From Failures of Pressurized Liquefied Gas Vessels / P. L. Holden, A. B. Reeves // IChemE Sym. Ser. – 1985. – Vol. 93 : Assessment and Control of Major Hazards. 205-20. Rugby, UK : Institution of Chemical Engineers, 1985.
- 180 HSE Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments (28.06.2012) URL: <http://www.hse.gov.uk/landuseplanning/failure-rates.pdf> (дата обращения 12.01.2018).
- 181 HSE. Canvey: An investigation of potential hazards from operations in the Canvey Island/Thurrock area, Her Majesty's Stationery Office. – London, 1978.
- 182 URL <https://www.cheric.org> (дата обращения 23.01.2018).

- 183 IAEA Safety series № 100. Evaluating the reliability of prediction made using environmental transfer models – IAEA, Vienna, 1989. –105 p.
- 184 ICRP Publication 37 : Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection – Elsevier Science, 1983.
- 185 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – 3-rd ed. – JCGM, 2008. –104 p.
- 186 JCGM 100 : 2008 GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. – Geneve, 2008. – 134 p.
- 187 Jiang, C. Probability-interval hybrid reliability analysis for cracked structures existing epistemic uncertainty / C. Jiang, X.Y. Long, X. Han, Y.R. Tao, J. Liu // Engineering Fracture Mechanics. – 2013. – Vol. 112 – 113. – pp. 148 – 164.
- 188 Kaarls, R. BIPM Proc.Verb. Com. Int. Poids et Mesures 49, A1-A12 (in French) / P. Giacomo // Metrologia. – 1981. – Vol. 17. – pp.73 –74 (in English).
- 189 Kahn, Herman. On Thermonuclear War / Herman Kahn – New York : Free Press, 1960. – 692 p.
- 190 Kaplan, Stanley. On The Quantitative Definition of Risk / Stanley Kaplan, B. John Garrick // Risk Analysis. – 1981. – Vol. 1. – № 1. – pp. 11 – 27.
- 191 Kawamura, P.I. The Evaporation of Volatile Liquids / P. I. Kawamura, D. MacKay // Journal of Hazardous Materials. – 1987. – Vol. 15. – pp. 343 –364.
- 192 Keynes, J.M. The general theory of employment / J. M Keynes // Q. J. Econ. – 1937. – Vol. 51(2). – pp. 209 –223.
- 193 Lee's Loss Prevention in the Process Industries. 3-rd ed. Vol. 1. – Elsevier, 2005. – 1455 p.
- 194 Lee's Loss Prevention in the Process Industries. 3-rd ed. Vol. 2. – Elsevier, 2005. – 1082 p.
- 195 Lee's Loss Prevention in the Process Industries. 3-rd ed. Vol. 3. – Elsevier, 2005. – 1168 p.
- 196 Lenoir, E.M. A Survey of Vapor Cloud Explosions. Second Update / E. M. Lenoir, J. A. Davenport // 26-th Loss Prevention Symposium. March 30 – April 2, New Orleans, LA. – New York : American Institute of Chemical Engineers, 1992. – pp. 112 – 121.
- 197 Lindley, D.V. Understanding Uncertainty / Dennis V. Lindley –John Wiley and Sons, 2006. – 263 p.
- 198 Lundin, J. Model Uncertainty in Fire Safety Engineering. Report 1020 / Johan Lundin – Lund, Lund university, 1999 – 176 p.
- 199 Mehr, R.I. Principles of insurance / R. I. Mehr, E. Cammack. 3-rd ed. –Homewood, Illinois : Richard D. Irwin Inc., 1961.

- 200 Mokhtarian, M.N. A new flexible and reliable interval valued fuzzy VIKOR method based on uncertainty risk reduction in decision making process: An application for determining a suitable location for digging some pits for municipal wet waste landfill / M. N. Mokhtarian, S. Sadi-Nezhad, A. Makui // *Computers & Industrial Engineering*. – 2014. – Vol. 78. – pp. 213 – 233.
- 201 Moore, R.E. Introduction to interval analysis / Ramon E. Moore, R. Baker Kearfott, Michael J. Cloud. SIAM, Philadelphia, 2009. – 224 p.
- 202 Morris, J.M. Aggregating and Communicating Uncertainty. Pattern Analysis and Recognition / J. M. Morris, R. J. D'Amore – Liberty Plaza, Rome, New York, 1980.
- 203 Mudan, K.S. Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires / K. S. Mudan, P. A. Croce // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* – Boston, MA, 1988.
- 204 Neumaier, A. Interval methods for systems of equations / Arnold Neumaier – Cambridge University Press, 1990. – 255 p.
- 205 Oberkampf, W.L. Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters / W. L. Oberkampf, J. C. Helton, C .A. Joslyn et. al. // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2004. – Vol. 85. – pp. 11 – 19.
- 206 OGP publications. Risk Assessment Data Directory. Report № 434-3 Storage incident frequencies, 2010. URL: <http://www.ogp.org.uk/pubs/434-03.pdf> (дата обращения 03.01.2018).
- 207 Parry, G.W. The characterization of uncertainty in Probabilistic Risk Assessments of complex Systems / Gareth W. Parry // *Reliability Engineering and System Safety*. – 1996. – Vol. 54. – pp. 119 – 126.
- 208 Pate'-Cornell, E.M. Uncertainties in risk analysis: Six levels of Treatment / Elisabeth M. Pate'-Cornell // *Reliability Engineering and System Safety*. – 1996. – Vol. 54. – pp. 95 – 111.
- 209 Pfeffer, I. Insurance and economic theory / I. Pfeffer – Homewood, Illinois : Richard D. Irwin Inc, 1956.
- 210 Philippe, J. Value at risk: the new benchmark for managing financial risk / J. Philippe – New York : McGraw-Hill Professional, 2001. – 596 p.
- 211 Risk and Uncertainty as a Research Ethics Challenge. National Committees for Research Ethics in Norway. Publication № 9. – Oslo, 2009. – 42 p.
- 212 Rowe, W.D. An Anatomy of Risk / W. D. Rowe. – New York : Wiley and Sons, 1977. – 488 p.
- 213 Rump, S.M. INTLAB – INTerval LABoratory. In Tibor Csendes. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1999. – pp. 77 – 104.
- 214 Sachs, R.G. The dependence of blast on ambient pressure and temperature. BRL Report № 466 / R. G. Sachs – Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1944.

- 215 Sackman, H. Delphi Critique, Expert Opinion, Forecasting and Group Processes / H. Sackman – Lexington, Mass. : Lexington Books, 1975.
- 216 Samson, S. A review of different perspectives on uncertainty and risk and an alternative modeling paradigm / Sundeep Samson, James A. Reneke, Margaret M. Wiecek // Reliability Engineering and System Safety. – 2009. – Vol. 94. – pp. 558 – 567.
- 217 Siuta, D. Uncertainty techniques in liquefied natural gas (LNG) dispersion calculations / Dorota Siuta, Adam S. Markowski, M. Sam Mannan // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2013. – Vol. 26. – pp. 418 – 426.
- 218 Starr, C. Social benefit versus technological risk / Chaunsey Starr // Science. – 1969. – Vol. 165. – pp. 1232 – 1238.
- 219 Sutton, O.G. Atmospheric Diffusion / O. G. Sutton – London, 1953.
- 220 The ASSURANCE project (Assessment of Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments). Final summary report. RISO National Laboratory. – Roskilde, 2002. – 52 p.
- 221 Treatment of Parameter and Model Uncertainty for Probabilistic Risk Assessments. – EPRI, Palo Alto, CA, 2008 – 176 p.
- 222 Uncertainty in industrial practice : a guide to quantitative uncertainty management / edited by Etienne de Rocquigny, Nicolas Devictor, Stefano Tarantola – John Wiley & Sons, 2008. – 366 p.
- 223 U.S. AEC. "Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accident in Large Nuclear Power Plants," U.S. Atomic Energy Commission, WASH-740, 1957.
- 224 U.S. Nuclear Regulatory Commission. Fault Tree Handbook (NUREG 0492), 1981. – 209 p.
- 225 U.S. Nuclear Regulatory Commission. Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRA's in Risk-Informed Decision Making (NUREG-1855). Draft Report for Comment. – 2007. – 113 p.
- 226 U.S. Nuclear Regulatory Commission. PRA Procedures Guide (NUREG/CR 2300). – Vol. 1. – 1983. – 487 p.
- 227 U.S. Nuclear Regulatory Commission. PRA Procedures Guide (NUREG/CR 2300). – Vol. 2. – 1983. – 181 p.
- 228 U.S. Nuclear Regulatory Commission. Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risk in Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Main report, 1975. – 226 p.
- 229 U.S. Nuclear Regulatory Commission. Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risk in Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Appendix III. Failure data, 1975. – 104 p.

230 U.S. Nuclear Regulatory Commission. Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risk in Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Appendix V. Quantitative results of accident sequences, 1975. – 142 p.

231 U.S. Nuclear Regulatory Commission. Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risk in Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Appendix VI. Calculation of reactor accident consequences, 1975. – 500 p.

232 U.S. Nuclear Regulatory Commission. Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risk in Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Appendix VII. Release of radioactivity in reactor accidents, 1975. – 292 p.

233 U.S. Nuclear Regulatory Commission. RG 1.174. An approach for using probabilistic risk assessment in risk-informed decisions on plant-specific changes to the licensing basis. Revision 2, 2011. – 37 p.

234 US EPA Guidelines for Exposure Assessment. Risk Assessment Forum, U.S. Environmental Protection Agency. /600/Z-92/001, May 29, Federal Register 57(104) : 22888-22938. – Washington, D.C., EPA, 1992.

235 US EPA Risk Assessment Guidance for Superfund : Volume I – Washington, DC, 1989.

236 US EPA Risk Assessment Guidance for Superfund : Volume III – Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment. – Washington, D.C., 2001. – 385 p.

237 US National Research Council. Risk Assessment in the Federal Government : Managing the Process. – Washington, D.C. : National Academy Press, 1983.

238 US National Research Council. Science and decisions. Advanced risk assessment. – Washington, D.C. : National Academy Press, 2009. – 403 p.

239 US National Research Council. Science and judgment in risk assessment. – Washington, D.C. : National Academy Press, 1994. – 650 p.

240 Van Asselt, M.B.A. Uncertainty in decision support: from problem to challenge. ICIS working paper I99-E006 / M. B. A. Van Asselt. – Maastricht : University of Maastricht, 1999.

241 Versteeg, M.F. External safety policy in the Netherlands: an approach to risk management / M. F. Versteeg // Journal of Hazardous Materials. – 1988. – Vol. 17. – pp. 215 – 222.

242 Walker, W.E. Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support / W. E. Walker, P. Harremoës, P. Rotmans // Integrated Assessment. – 2003. – Vol. 4. – № 1. – pp. 5 – 17.

243 Wang, H. Combustion kinetic model uncertainty quantification, propagation and minimization / Hai Wang, David A. Sheen // Progress in Energy and Combustion Science. – 2015. – Vol. 47. – pp. 1 – 31.

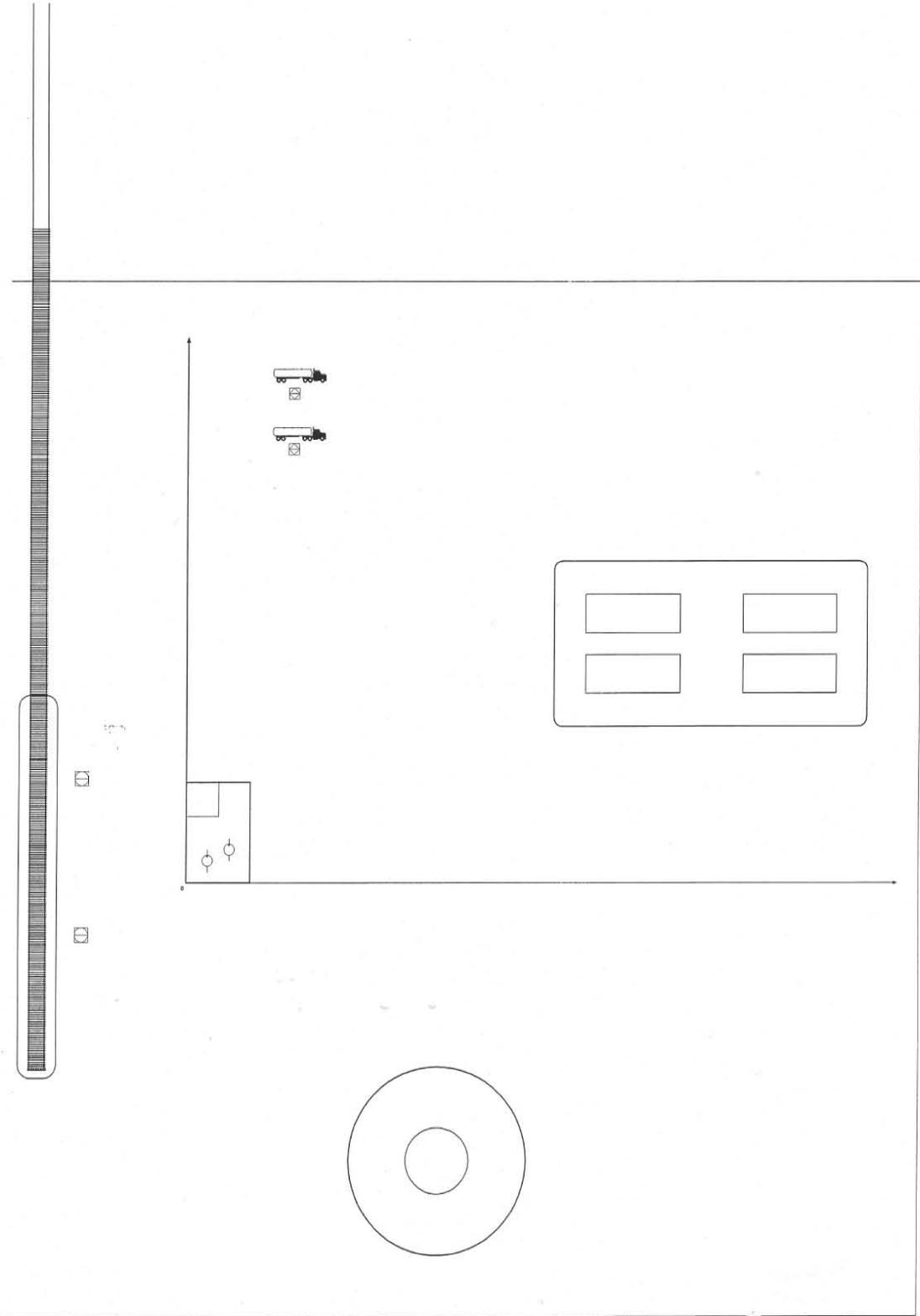
244 Willett, A.H. The economic theory of risk and insurance / A. H. Willett. Reprint, Homewood, Illinois : Richard D. Irwin Inc, 1901.

245 Winkler, Robert L. Uncertainty in probabilistic risk assessment / Robert L. Winkler // Reliability Engineering and System Safety. – 1996. – Vol. 54. – pp. 127 – 132.

- 246 World Bank Technical paper number 55. Techniques for Assessing Industrial Hazards. A Manual. – Washington D.C., 1988. – 170 p.
- 247 Wu, J. A Chebyshev interval method for nonlinear dynamic systems under uncertainty / Jinglai Wu, Yunqing Zhang, Liping Chen, Zhen Luo // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – Vol. 37. – pp. 4578 – 4591.
- 248 Wu, J. An interval uncertain optimization method for vehicle suspensions using Chebyshev metamodels. / Jinglai Wu, Zhen Luo, Yunqing Zhang, Nong Zhang // Applied Mathematical Modelling. – 2014 (A preprint).
- 249 Wu, J. A new uncertain analysis method and its application in vehicle dynamics / Jinglai Wu, Zhen Luo, Nong Zhang, Yunqing Zhang // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2015. – Vol. 50 – 51. – pp. 659 – 675.
- 250 Xie, Mengmeng. Thermodynamic and gas dynamic aspects of a BLEVE (Draft № 04-200708) / Mengmeng Xie. – Delft University of Technology, 2007. –70 p.
- 251 Young, R.C. The algebra of many-valued quantities / R. C. Young // Mathematische Annalen. – 1931. – Band 104. – S. 260 – 290. URL: <http://www.cs.utep.edu/interval-comp/young.pdf> (дата обращения 14.03.2013).
- 252 Zhang, H. Structural reliability analysis on the basis of small samples: An interval quasi-Monte Carlo method / Hao Zhang, Hongzhe Dai, Michael Beer, Wei Wang // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 37. – pp. 137 – 151.
- 253 Zio, E. Methods for representing uncertainty : a literature review (2015) / Enrico Zio, Nicola Pedroni. URL <http://www.FonCSI.org> (дата обращения 20.03.2018).

## ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А



М 1:500

Генеральный план склада светлых нефтепродуктов

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

«КАЗАН МИЛЛИ ТИКШЕРЕНУ  
ТЕХНОЛОГИЯ УНИВЕРСИТЕТЫ»  
ЮГАРЫ ҺӨҢӨРИ БЕЛЕМ БИРУ  
ФЕДЕРАЛЬ ДӨҮЛӘТ БЮДЖЕТ  
МӨГАРИФ УЧРЕЖДЕНИЕСЕНЕҢ  
«СОЮЗХИМПРОМПРОЕКТ»  
ПРОЕКТ ИНСТИТУТЫ

Юр. адрес: 420015, Казан, К. Маркс ур., 68  
✉ 420032, Казан, Димитров ур., 11  
☎ (8-843) 554-76-21 факс 599-65-29  
<http://www.cxpp.ru>  
E-mail: [cxpp@cxpp.ru](mailto:cxpp@cxpp.ru)



ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ  
«СОЮЗХИМПРОМПРОЕКТ»  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Юр. адрес: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68  
✉ 420032 г. Казань, ул. Димитрова, 11  
☎ (8-843) 554-76-21 факс 599-65-29  
<http://www.cxpp.ru>  
E-mail: [cxpp@cxpp.ru](mailto:cxpp@cxpp.ru)

## Справка

Об использовании диссертационной работы Колесникова Е.Ю.

Задача управления промышленной и пожарной безопасностью направлена на снижение риска аварий на опасных производственных объектах, является важной составляющей частью процедуры проектирования, и производится расчетно-статистическими методами с использованием достаточно большого числа методик и рекомендаций. Практика показывает, что получаемые точечные значения риска содержат в себе существенную скрытую неопределенность, а методология анализа количественной оценки этой неопределенности до настоящего времени отсутствует.

Методология количественной оценки риска аварий и чрезвычайных ситуаций, включающая метод количественной оценки неопределенности параметров с помощью метода интервальной математики, доложенная к.ф.м.н. Колесниковым Е.Ю. на заседании научно-технического совета (НТС) при МЧС РТ от 18.02.2015 года, в определенной мере эту задачу решает.

С учетом рекомендаций НТС при МЧС РТ разработанная методология была использована Проектным институтом «Союзхимпромпроект» ФГБОУ ВПО «КНИТУ» при разработке спец раздела проектной документации – «Перечень мероприятий по гражданской обороне, мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» ряда объектов нефтехимического комплекса РТ, а именно:

-ПАО «Нижнекамскнефтехим» (реконструкция производства галлобутилкаучуков, расширения сливо-наливных терминалов);  
-ОАО «КЗСК-Силикон» (производство метилхлорсиланов);  
-ОАО «Казаньоргсинтез» (строительство короткоцикловой адсорбции) и других объектах для оценки параметров риска.

Технический директор  
ПИ «Союзхимпромпроект»



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kamalov V.G.', written over a horizontal line.

Камалов В.Г.

19.11.2015

## ПРИЛОЖЕНИЕ В



Общество с ограниченной ответственностью

Республика Татарстан, 420126, г. Казань, ул. Чистопольская, 34, а/я 296  
 ИНН 1657071754/КПП 165701001  
 тел/факс (843) 518-86-55 e-mail: b-ex-kazan@mail.ru

№ 168/03 от « 28 » декабря 2015 г.

## СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Колесникова Е.Ю.

Методология количественной оценки неопределенности, возникающей при оценке риска возможных аварий и чрезвычайных ситуаций, сопутствующих эксплуатации опасных производственных объектов, доложенная к.ф.-м.н. Колесниковым Е.Ю. на заседании научно-технического совета (НТС) при МЧС РТ 18.02.2015 года, позволяет более обосновано подходить к решению задачи оценки параметров риска.

Данная методология была использована специалистами ООО «Эксперт Бюро» при разработке проектной документации в расчетной части спец.разделов: «Перечень мероприятий по гражданской обороне, мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» и Деклараций промышленной и пожарной безопасности опасных производственных объектов нефтехимической отрасли при расчетах основных параметров риска для учета сопутствующей неопределенности.

Заместитель директора  
 по направлению пожарной  
 безопасности и разработке  
 проектной документации, к.т.н.

И.Р. Хайруллин



Подпись И.Р. Хайруллина  
 подтверждаю  
 директор ООО «Эксперт Бюро»  
 О.А. Фридрихов

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Поволжский государственный  
технологический университет»  
(ФГБОУ ВПО «ПГТУ»)  
пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола,  
Республика Марий Эл, 424000  
Телефон (8362) 68-68-70, факс (8362) 41-08-72  
E-mail: [info@volgatech.net](mailto:info@volgatech.net), <http://www.volgatech.net/>  
ИНН/КПП 1215021281/121501001,

8.12.2014 № 19  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной  
деятельности

Н.Н. СТАРЫГИНА

## АКТ

внедрения в учебный процесс научно-методических материалов, полученных в ходе диссертационного исследования доцента Колесникова Евгения Юрьевича

Мы, нижеподписавшиеся сотрудники ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационного исследования, проведенного доцентом Е.Ю. Колесниковым, посвященные количественной оценке пожарного риска интервально-матричным методом, использованы в учебном процессе на факультете природообустройства и водных ресурсов ФГБОУ ВПО «ПГТУ» по направлению подготовки бакалавров «Техносферная безопасность» при изучении дисциплины «Надёжность технических систем и техногенный риск» при выполнении практических работ.

Председатель комиссии  
Зам. начальника УМУ

Л.В. Смоленникова

Члены комиссии  
Декан ФПиВР

Зав. кафедрой БЖД

А.И. Толстухин

К.А. Смотрин