Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

На правах рукописи

ТУМАНОВ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННОЙ АВАРИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ

Специальность 05.26.02 - «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (в морской индустрии)»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
Гуменюк Василий Иванович
доктор технических наук, профессор

Калининград – 2020

Оглавление

Введение……..6

Глава 1 Плавучие атомные теплоэлектростанции как потенциально опасные объекты энергетики морского базирования 19

1.1 Предмет и задачи науки о безопасности в чрезвычайных ситуациях 19

1.1.1 Основные понятия и определения 19

1.2 Основные проблемы обеспечения безопасности плавучих атомных стаций как объектов воздействия поражающих факторов источников ЧС..... 43

1.3 Анализ маршрутов МП РМ на ПАТЭС 57

1.4 Анализ причин аварийных ситуаций при перевозке РМ на ПАТЭС 58

1.6 Недостатки и пути совершенствования существующего научно-методического аппарата оценки изолированного и комбинированного действия физических ПФ источников ЧС при ТА при транспортировании РМ в МП 62

1.7 Выводы по главе 1 64

Глава 2 Анализ конструктивных особенностей СХПЖРО, влияющие на их поведение при аварийных режимах мультимодальной перевозки 66

2.1 Основные характеристики ЖРО 66

2.2 Анализ причин ТА на СХПЖРО 70

2.3 Выводы по главе 2 70

Глава 3 Разработка возможных вариантов развития проектных и запроектных аварийных ситуаций, при которых возможно нарушение герметичности котла цистерны с жро и возникновение РА..... 72

3.1 Формализованное представление структуры развития техногенной аварии с помощью метода дерева событий. 72

3.2 Детерминированный расчет последствий техногенного пожара на конструкции ПАТЭС. 76

3.3 Детерминированный расчет последствий техногенного взрыва на конструкции ПАТЭС 78

3.3.1 Оценка действия ВУВ на конструкции ПАТЭС 81

3.3.2 Оценка поражающего действия осколков на конструкции ПАТЭС 91

3.4 Детерминированная оценка радиационных последствий аварии со средствами хранения и транспортировки ЖРО 99

3.5 Выводы по главе 3 104

Глава 4 Разработка теоретических вероятностных методов для описания изолированного и комбинированного действия физических поражающих факторов на человека и технические объекты при ТА при транспортировании РМ в МП 105

4.1 Теоретические методы исследования воздействия поражающих факторов на технические объекты 105

4.2 Методы описания действия ПФ источников ЧС при изолированном действии (одномерный случай) 109

4.3 Методы описания действия ПФ источников ЧС при комбинированном действии (двумерный случай) 118

4.4 Выводы по 4 главе 125

Глава 5 Экспериментальная проверка гипотезы предложенного ФЗВ в форме логарифмически нормального закона 127

5.1 Математическая модель пробивного действия осколков при взрыве газовых баллонов с учетом ФЗВ 127

5.2 Разработка методики проведения баллистических испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона

распределения случайной скорости встречи осколков разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины его внедрения в нее 134

5.2.1 Планирование эксперимента 134

5.2.2 Краткое описание методики проведения эксперимента 138

5.2.3 Расчетно-экспериментальное исследование стойкости образцов 140

5.3 Статистическая проверка ФЗВ 145

5.4 Выводы по главе 5 169

Глава 6 Обоснование способов повышения защищенности СХПЖРО на ПАТЭС от воздействия ПФ источников ЧС 171

6.1 Разработка математической модели защищенности потенциально опасных объектов 171

6.2 Методика по оценке состояния защищенности, позволяющая определить комплекс мероприятий, направленных на повышение защищенности исследуемого объекта СХПЖРО 183

6.3 Мероприятия по предупреждению аварий и снижению ущерба 186

6.4 Математические модели эффективности мероприятий по предупреждению ЧС и повышению защищённости СХПЖРО 190

6.5 Выводы по главе 6 200

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 202

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 204

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 207

Приложение А Акты об использовании результатов диссертации 232

Приложение Б Перечень исходных событий и их классификация 234

Приложение В Исходные данные для проведения статистических исследований по определению параметров ФЗВ 261

Приложение Г Проверка гипотезы о виде распределения по критерию Колмогорова 265

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации.

Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ЧС) является сложным научно-техническим явлением, смысл которого несмотря на широкое употребление этого понятия, его сущность и содержание остаются теоретически мало исследованными. Определенная сложность в исследовании и решении проблем безопасности в ЧС заключается в том, что непосредственное измерение безопасности невозможно. В настоящее время проблемы обеспечения безопасности в ЧС существуют практически во всех областях деятельности человека. Современный этап развития научной мысли в сфере проблем безопасности в ЧС характеризуется попытками перехода от эмпирического к теоретическому уровню исследования состояния защищенности объектов от опасности, как потенциальной или реализованной возможности появления у персонала и населения поражений различной степени тяжести, разрушения зданий, строений и объектов инфраструктуры, а также повреждения технологического оборудования, техники в результате техногенной аварии (ТА).

Человечество давно столкнулось с проблемой воздействия поражающих факторов (ПФ) источников ЧС на различные объекты, поэтому проблема теоретического описания действия, в том числе и комбинированного, различных веществ, энергии и информации на технические объекты и живые организмы является одной из важнейших в защите в чрезвычайных ситуациях и имеет большое прикладное значение в различных сферах деятельности человечества. Особенно актуальна проблема описания комбинированного действия ПФ источников ЧС при ТА на радиационно, пожаро и взрывоопасных объектах.

Сегодня проблема оценки комбинированного действия поражающих факторов начинает рассматриваться как важнейший аспект проектирования, создания и использования различных транспортных средств в морской

индустрии, как наиболее уязвимых, что обуславливается, с одной стороны, сложностью структуры указанных объектов, а, с другой стороны, тем возможным ущербом, который может быть нанесен в случае ЧС, включая гибель экипажа транспортных средств, а также катастрофические последствия, связанные с повреждением перевозимых опасных грузов и влиянием на население и прибрежные территории.

Дальнейшее усложнение энергетических установок и средств обеспечения транспортировки в мультимодальных перевозках (МП) и невозможность решения проблемы безопасности в ЧС с узковедомственных позиций, выдвигает на повестку дня вопрос о разработке новых направлений оценки опасности техногенной аварии при транспортировании радиоактивных материалов в МП.

Степень разработанности темы.

Вопросам оценивания опасности и описания воздействия ПФ источников ЧС при ТА посвящены исследования многих ведущих отечественных ученых: А.А. Агапова, В.А. Аксенова, В.А. Акимова, П.Г. Белова, Н.Ю. Бугаковой, А.А. Быкова, В.И. Гуменюка, С.В. Горбунова, А.И., Гражданкина, И.В., В.Ф. Демина, В.Ф. Захарова, А.М. Кармишина, В.А. Киреева, Н.А. Махутова, В.М. Минько, А.С. Можаева, А.А. Музалевского, В.А. Острейковского, В.М. Пономарева, О.Г. Фаустовой, М.И Фалеева, В.Н. Филиппова, Н.Я. Щербины, В.В. Яковлева и др.

Несмотря на то, что имеется огромное количество данных по изолированному и комбинированному действию ПФ источников ЧС на различные объекты, до сих пор практически отсутствует их теоретическое обобщение и осмысление. До настоящего времени не решены вопросы, связанные с полным перечнем характеристик ПФ, особенно при их комбинированном действии. Вопросы обеспечения защищенности объектов от ПФ источников ЧС являются недостаточно разработанными. Наибольшие

проблемы возникают при формулировании общетеоретических основ механической, радиационной (МР) защищенности объектов техносферы при ЧС техногенного характера. В связи с этим вопросы, разрабатываемые в рамках развития теории МР защищенности, представляют несомненный теоретический и практический интерес.

Таким образом, обобщая вышеизложенное, актуальность темы исследования обуславливается несколькими основными причинами: комбинированностью воздействия ПФ источников ЧС на объект; сложностью исследуемого технического объекта — ПАТЭС, на ограниченном пространстве которого в силу конструктивных особенностей сосредоточены большое количество опасных веществ и энергии; высокой степенью уязвимости объекта к воздействию ПФ природного и техногенного характера при транспортировке РМ в арктической зоне РФ, недостаточной возможностью защиты расстоянием в связи с сосредоточенностью в ограниченном пространстве нескольких источников ЧС и конструктивными особенностями объекта, нерешенностью вопросов, связанные с полным перечнем характеристик ПФ источников ЧС при ТА, особенно при их комбинированном действии, недостаточной разработанностью общетеоретических основ МР защищенности потенциально опасных объектов (ПОО) при ЧС техногенного характера, недостаточной разработанностью показателей эффективности мероприятий по повышению защищенности объектов от ПФ источников ЧС.

Важность и своевременность представленного исследования также подтверждается участием автора в выполнении в рамках научно-технической федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2015 годы научно-исследовательской работы «Снижение риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф».

Цель диссертационного исследования — исследование механизмов воздействия ПФ источников ЧС в части совершенствования теоретических методов оценки изолированного и комбинированного действия ПФ для оценивания опасности ТА при транспортировании РМ в МП и обоснование наиболее полной характеристики ПФ, вызывающих заданную степень тяжести разрушения ПОО.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

Проведен анализ статистики аварийных ситуаций при перевозке РМ в МП и выявлены непосредственные и основные причины ТА.

Проведен анализ конструктивных особенностей средств хранения и перевозки жидких радиоактивных отходов (СХПЖРО), влияющие на их поведение при аварийных режимах и определены параметры механического и теплового воздействия на котел цистерны СХПЖРО в момент потери герметичности котла.

Разработаны сценарии развития вероятных и наиболее опасных аварийных ситуаций со СХПЖРО на ПАТЭС.

Предложены и апробированы теоретические методы для описания изолированного и комбинированного действия физических ПФ источников ЧС в условиях ТА при транспортировании РМ в МП.

Разработана и апробирована методика проведения испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной величины (СВ) глубины внедрения в заданную преграду осколков разрушенных конструкций промышленного ПОО.

Разработаны математические модели защищенности объектов и их элементов, раскрывающих зависимость между защитной способностью объекта, уровнем ПФ источника ЧС и параметрами состояния ПОО, которые позволяют учитывать конструктивно-технические и эксплуатационно-технические факторы, влияющие на ее уровень.

Разработаны мероприятия повышения защищенности СХПЖРО на ПАТЭС от воздействия ПФ источников ЧС с учетом предложенных моделей защищенности.

Разработана математическая модель и показатели эффективности мероприятий, раскрывающих зависимость между совокупными затратами на проведение мероприятий по предупреждению ЧС техногенного характера и предотвращенным ущербом от воздействия ПФ источников ЧС, которые позволяют обоснованно распределять ограниченные ресурсы по поддержанию уровня защищенности ПАТЭС и ее составных частей.

Объект исследования — СХПЖРО на ПАТЭС в условиях воздействия ПФ источников ЧС при МП.

Предметом исследования являются **з**акономерности, раскрывающие оценку опасности ТА при транспортировании РМ и зависимости защищенности средств хранения и перевозки ЖРО в МП от параметров ПФ источников ЧС, характеристик ПОО и условий воздействия, наличия и типа средств защиты.

Рассмотренные выше цель, объект и предмет диссертационного исследования позволяют сформулировать решаемую крупную **научную проблему**, имеющую важное социальное и хозяйственное значение, совершенствования научно-методического аппарата оценки защищенности СХПЖРО на ПАТЭС при МП РМ в условиях воздействия ПФ источников ЧС и формирования требований по обеспечению их стойкости при различных вариантах использования средств и способов защиты.

Диссертация посвящена исследованию механизмов воздействия физических ПФ источников ЧС в части совершенствования теоретических методов оценки изолированного и комбинированного действия ПФ, начиная с постановок задач, их математического описания, анализа результатов решения, их трактовке и использования в прикладных задачах оценки защищенности объектов. В работе предложена наиболее полная

характеристика ПФ источников ЧС при их изолированном и комбинированном действии на объекты техносферы, предложен перечень характеристик этих факторов, раскрывается их статистический и прикладной характер.

Методы исследования. В основу теоретических исследований были положены методы и концепции теории вероятностей и математической статистики, теория поражающего действия ОМП, теории горения и взрыва, исследования операций. Методы исследования базировались на аналитическом обобщении известных научных и технических результатов, физическом и математическом моделировании, обработке экспериментальных данных методами математической статистики, сопоставлении полученных автором результатов экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных условиях, с соответствующими теоретическими результатами, а также с результатами, полученными другими авторами.

Научная новизна результатов исследования.

Новизна проведенных теоретических исследований может рассматриваться как определенный научно-технический прорыв в области теории воздействия ПФ источников ЧС, так как впервые разработана теория, описывающая не только известные экспериментальные (как при действии одного, так и при комбинированном воздействии ПФ источника ЧС) данные, но и позволяющая прогнозировать результаты совместного действия различных физических ПФ. Очевидно, что изложенные теоретические положения могут быть перенесены и на другие сферы научной деятельности, где рассматриваются аналогичные процессы. Несомненно, что разработанную теорию можно использовать для описания комбинированного действия не только физических факторов, но и факторов другой природы: химических и биологических, а также произвольную

комбинацию физических, химических и биологических и факторов внешней среды, действующих на исследуемые объекты.

Основные положения разработанной теории воздействия ПФ источников ЧС на ПОО, описывающей вероятность возникновения эффектов воздействия не ниже требуемых, заключаются в том, что наиболее полной характеристикой ПФ источников ЧС при его воздействии на технический ПОО при описании потенциальной или реализованной возможности появления у персонала и населения поражений различной степени тяжести, разрушения зданий, строений и объектов инфраструктуры, а также повреждения технологического оборудования, техники в результате ТА является закон распределения случайных величин негативного воздействия ПФ, вызывающих заданный эффект у объекта, или, другими словами, факторный закон воздействия (ФЗВ).

Научная новизна работы заключается в разработке новых методов описания и оценки комбинированного воздействия двух физических ПФ источников ЧС в условиях ТА при транспортировании РМ в МП, отличающихся от известных применением специального параметра — коэффициента совместного действия (КСД), отвечающий за эффекты синергизма и антагонизма при комбинированном действии двух ПФ, позволяющим учитывать характер совместного действия двух поражающих факторов: усиление, ослабление или независимое действие и рассматриваемой в качестве важной, неизвестной до настоящего времени, характеристики опасности ТА.

Впервые разработаны теоретические вероятностные методы для описания комбинированного действия физических ПФ источников ЧС на техносферу, которые можно адаптировать и для факторов другой природы: химических и биологических, а также произвольную комбинацию химических, биологических и физических факторов внешней среды, действующих на технические системы и живые организмы.

Разработана новая методика проведения испытаний образцов, позволяющая определять по экспериментальным данным вид и основные параметры закона распределения случайной величины глубины внедрения в заданную преграду осколков разрушенных конструкций промышленного ПОО.

В отличие от существующих, разработанные математические модели защищенности объектов и их элементов раскрывают зависимость между защитной способностью объекта, уровнем ПФ источника ЧС и параметрами состояния объекта и позволяют учитывать конструктивно-технические и эксплуатационно-технические факторы, влияющие на ее уровень.

Впервые разработана методика оценки предотвращенного ущерба от ЧС техногенного характера, которая в отличие от существующих, раскрывает зависимость между затратами на превентивные мероприятия, эффектами от них и предотвращенным ущербом, позволяет оценить эффективность мероприятий по предотвращению ЧС и получить интегральный показатель эффективности затрат на мероприятия — чистый предотвращенный ущерб (ЧПУ).

Теоретическая значимость работы состоит в развитии теории воздействия ПФ источников ЧС в части совершенствования понятийного и научно-методического аппарата оценки защищенности СХПЖРО на ПАТЭС при МП и разработке теоретических вероятностных методов описания изолированного и комбинированного действия физических ПФ источников ЧС в условиях ТА при транспортировании РМ в МП.

Практическая значимость работы

Для оценки параметров ФЗВ — закона распределения СВ глубины внедрения в заданную преграду осколков разрушенных конструкций промышленного ПОО разработаны и апробированы:

испытательная установка — устройство для проведения испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров

ФЗВ — закона распределения СВ глубины внедрения в заданную преграду осколков разрушенных конструкций промышленного ПОО;

пакет прикладных программ «Программный комплекс для информационно-управляющей системы оценки риска ЧС природного и техногенного характера на ПОО энергетики». В основе расчетного алгоритма лежат строгие математические формулы теории вероятности. Достоверность расчетов по ИУСОР ЧС ПООМБ проверяется разного рода тестовыми расчетами. Автором получено свидетельство № 2017610715 от 27.01.2017 о государственной регистрации программы в Роспатенте РФ.

Результаты диссертации А.Ю. Туманова использованы в деятельности следующих предприятий, научных и образовательных организаций:

1. Санкт-Петербургский филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Дирекция по сооружению и эксплуатации плавучих атомных теплоэлектростанций».

2. Санкт-Петербургский филиал НОУ ДПО "ЦИПК Росатома".

3. АО "Пассажирский Порт Санкт-Петербурга "Морской фасад".

Научно исследовательские работы (НИР), результаты которых отражены в диссертационном исследовании, начали проводиться с 2008 года в основном по инициативе соискателя и его коллег.

Начиная с 2010 года, работа по всем указанным выше основным направлениям стала проводиться соискателем в рамках следующих отечественных и международных программ, проектов и НИР:

Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме: «Научные основы прогнозирования опасностей, снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф».

НИР в рамках госзадания № 3.8874.2017/БЧ, на 2017–2019 годы по теме «Развитие теории и методологии оценки риска чрезвычайных ситуаций

природного и техногенного характера на потенциально опасных объектах энергетики морского базирования».

Международная НИР на 2018 год в рамках двухстороннего сотрудничества СПбПУ Петра Великого (РФ) и университета Циньхуа (КНР) по теме «Комплексная оценка экологической, пожарной и техногенной безопасности российских прибрежных зон Крыма и арктической зоны.

Международная НИР на 2019 год в рамках двухстороннего сотрудничества СПбПУ Петра Великого (РФ) и университета Циньхуа (КНР) по теме «Оценка комплексной безопасности северных прибрежных районов России в условиях изменения климата и увеличения антропогенного давления с упором на пожары, деградацию вечной мерзлоты, водных ресурсов и почв.

Достоверность полученных результатов

Обоснованные показатели опасности ТА и методы их теоретической оценки в частных и предельных случаях приходят к известным, применяемым в настоящее время показателям и математическим моделям их оценивания, что подтверждает корректность теоретических исследований.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных в рамках разработанной методики определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной величины глубины внедрения в заданную преграду осколков разрушенных конструкций промышленного ПОО показали удовлетворительную сходимость рассчитываемых показателей с теоретическими расчетами. Полученные результаты не только не противоречат современным представлениям в рассматриваемой предметной области, но и существенно повышают знание и понимание об опасности ТА на ПАТЭС.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в разработке теоретических вероятностных методов для описания комбинированного действия физических ПФ на

технические ПОО и организации практического внедрения методических предложений. Автором инициировалось проведение исследований в рамках настоящей тематики, а для работ, выполненных в соавторстве, осуществлялись анализ и обобщение результатов.

Автором разработана методика определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной величины глубины внедрения в заданную преграду осколков разрушенных конструкций промышленного ПОО.

Автором подготовлен и проведен эксперимент на образцах из различных материалов и получены экспериментальные данные, о чем имеются протоколы испытаний.

Реализация. Теоретические и практические результаты, полученные в диссертационной работе:

использованы при проведении ряда научно-исследовательских работ: исследования Межфакультетского научно-образовательного центра «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» 2010-2013г. в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2016 годы на тему «Научные основы прогнозирования опасностей, снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф», НИР (№13.9974.2017/БЧ фундаментального характера в рамках государственного задания на 2017-2019г. по теме «Развитие теории и методологии оценки риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на потенциально опасных объектах энергетики морского базирования», что подтверждается соответствующим отчетами;

внедрены в учебный процесс Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Результаты исследования использованы при разработке дисциплин «Оценка риска ЧС природного и техногенного характера», «Противоаварийная устойчивость объектов экономики»,

«Оценка эффективности интегрированных систем безопасности», «Интегрированные системы обеспечения техносферной безопасности» в высшей школе техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Апробация результатов исследования. Материалы исследования докладывались на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях (2010-2018 гг.),: III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X Всероссийских научно-практических конференций «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (СПбГПУ, 2010-2018), XIV Всероссийской научно-методической конференции «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах (Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2010 г.), Научно-практической конференции «Проблемы управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях» (СПбГПУ. 2010), Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Основы инновационной деятельности», Москва, РОУ, Международной научно-практической конференции Неделя науки (СПбГПУ, 2010-2017), Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке» (СПбГПУ, 2011-2016 г., СПб), Всероссийской научно-методической конференции «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах» (СПб, 2011-2016), II Международной научно-технической конференции «Энергетические системы», Белгород (2017 г.), Международной научной конференции «Far East Con», Владивосток (2018, 2019), 4 научных семинарах и др.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности Представленные в диссертации научные положения соответствуют следующим областям исследования паспорта специальности 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях (в морской индустрии):

1 – Теория, модели и методы исследования механизмов воздействия на население, техносферу и биосферу поражающих факторов источников чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;

2 – Научно-методические основы систематики, ранжирования, типизации и классификации чрезвычайных ситуаций, критически важных и потенциально опасных объектов;

4 – Теория и методология управления риском чрезвычайных ситуаций, методы оценки потерь и ущерба от чрезвычайных ситуаций;

Публикации. По результатам исследований опубликованы более 80 научных трудов, из которых 4 монографии, статьи в журналах и научно-технических сборниках (из них 14 статей – в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук), в материалах более 20 международных, всероссийских научно-технических конференций и нашли отражение в двух РИД (2 свидетельства Роспатента о регистрации программы для ЭВМ). Список основных работ приведен в конце работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Диссертация изложена на 279 страницах машинописного текста, содержит 29 таблиц, 46 рисунков, 109 формул, список сокращений и условных обозначений.

Глава 1 ПЛАВУЧИЕ АТОМНЫЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫЕ ОБЪЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

1.1 Предмет и задачи науки о безопасности в чрезвычайных ситуациях

1.1.1 Основные понятия и определения

Безопасность в ЧС в нормативных документах определяется как «состояние защищенности населения, объектов экономики и окружающей природной среды от опасностей в чрезвычайных ситуациях» [3]. Это определение конкретизирует общее понятие безопасности, данное в [4] для чрезвычайных ситуаций.

Безопасность в ЧС соответствует области науки, изучающей закономерности возникновения и развития чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера, разрабатывающей теоретические, научно-методические и практические проблемы обеспечения безопасности и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Результаты исследований используются при создании и совершенствования методов, способов и средств, обеспечивающих защиту населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера.

В научном направлении безопасности в чрезвычайных ситуациях важное место занимает прикладная наука — защита в чрезвычайных ситуациях. В рамках защиты в чрезвычайных ситуациях рассматриваются теоретические аспекты теории защищенности объектов от поражающих факторов источников ЧС. При анализе понятия «безопасность в ЧС» необходимо отметить, что научное познание есть переход от постановки проблем к их решению, сопровождаемый возникновением новых проблем. С точки зрения теории систем и системного анализа проблема есть несоответствие между существующим и желаемым состоянием системы.

Проблема, иерархия проблем следует из рассмотрения системы вещество – машина – среда.

Остановимся на таких важных понятиях науки как объект и предмет исследования. Объект исследования — область научных изысканий, в пределах которой объективно существует, выявлена и сформулирована научная проблема. Это система закономерностей, связей, отношений, видов деятельности, в рамках которой зарождается проблема, которая требует решения.

Объектом исследования в теории защищенности в чрезвычайных ситуациях, в широком смысле, можно считать эффекты, возникающие в системе вещество – машина – среда. Предмет исследования более узок и конкретен. Из общей системы, представляющей объект исследования, выделяется часть системы или процесс, протекающий в системе, являющийся непосредственно предметом изучения. Так, ряд авторов определяют предмет защиты в ЧС как защищенность объектов или процесс оценки защищенности, развивающийся в технических системах. В этой связи, необходимо отметить следующее.

Объектом теоретической науки о безопасности в ЧС являются эффекты, развивающиеся в технических системах при действии на них поражающих факторов источников ЧС.

Объект исследования для многих классов чрезвычайных ситуаций и их источников, и не только физических, но и химических, и биологических изучен достаточно полно [79, 80, 81, 100, 115, 126, 133, 153 и др.].

Предметом теоретической науки о безопасности в ЧС являются закономерности, модели и способы и приемы описания эффектов, возникающих при изолированном и комбинированном действии поражающих факторов источников ЧС различной природы на технические и биообъекты.

Основные нерешенные задачи, которые стоят перед безопасностью в

ЧС, как областью современной науки, это:

разработка теории, моделей и методов исследования механизмов воздействия на население, техносферу и биосферу поражающих факторов источников чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;

разработка научно-методических основ систематики, ранжирования, типизации и классификации чрезвычайных ситуаций, критически важных и потенциально опасных объектов, зонирования территорий по степени опасности;

разработка теории и методологии управления риском чрезвычайных ситуаций, методов оценки потерь и ущерба от чрезвычайных ситуаций;

развитие методологии автоматизированных информационно-управляющих систем РСЧС.

Завершая краткий анализ понятия «безопасность в ЧС», отметим, что безопасность в ЧС и защита в ЧС имеют, по существу, один и тот же объект исследования: эффекты воздействия ПФ источников ЧС на технические системы и живые организмы. Поэтому, можно дать следующее определение безопасности в ЧС как науки.

Безопасность в ЧС — это наука, занимающаяся изучением отрицательных эффектов при действии поражающих факторов источников ЧС различной природы на технические и биообъекты и защитой от проявления этих эффектов.

В связи с таким определением безопасности в ЧС понятие «Защита в ЧС» можно рассматривать как некоторую составляющую безопасности в ЧС, так как последняя изучает не только модели защищенности объектов.

Одной из нерешенных проблем теории безопасности в ЧС на современном этапе ее развития является проблема описания действия, в том числе и комбинированного, различных веществ и энергии на технические объекты и человека. Эта проблема является одной из важнейших в безопасности в чрезвычайных ситуациях и имеет большое прикладное

значение в различных сферах деятельности человечества. Проблема описания комбинированного действия ПФ на техносферу, персонал, население и территории особенно актуальна при техногенных авариях на химически, радиационно, пожаро и взрывоопасных объектах.

Известно, что уровень развития любой теории и соответствующих ей научных дисциплин в большой степени зависит от того какой понятийный аппарат в них заложен.

Известно, что понятийный аппарат любой области деятельности, любой науки образуют понятия (словесные выражения представлений о чем-нибудь, суждения о предмете, отражающие его сущность) и правила их употребления. В упорядоченном виде он представляет собою систематизированный перечень всех или основных) потребляемых в определенной научной дисциплине понятий и их определений. Понятия бывают различного уровня обобщения: в широком смысле и в узком. Они могут трактоваться как общенаучные и как частнонаучные в связи с теми или иными приложениями. Понятия связаны друг с другом и частично могут перекрываться по своему содержанию. Для того чтобы лучше понять связи, существующие между этими понятиями, целесообразно воспользоваться принятым в традиционной логике приемом представления отношений между понятиями с помощью кругов Эйлера, представленных в [227].

Проведем краткий обзор понятийного аппарата безопасности в ЧС. Для этого рассмотрим основные понятия «опасность», «потенциально опасный объект», «критически важный объект». В Приказе МЧС РФ от 28 февраля 2003 г. N 105 "Об утверждении Требований по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения" [1] предлагается считать, что опасность чрезвычайных ситуаций техногенного характера для населения и территорий может возникнуть в случае аварий на ПОО, на которых используются, производятся, перерабатываются, хранятся и транспортируются

пожаровзрывоопасные, опасные химические и биологические вещества. При прогнозировании ЧС определяются показатели степени риска для населения в связи с возможными авариями на потенциально опасных объектах (потенциальный риск, коллективный риск, индивидуальный риск, риск нанесения материального ущерба); опасность, которую представляет чрезвычайная ситуация техногенного характера в общем (интегральном) риске чрезвычайных ситуаций. Для установления опасности чрезвычайных ситуаций техногенного характера обычно определяются:

расчетные сценарии возможных крупных аварий, приводящих к чрезвычайным ситуациям, (условия возникновения, поражающие факторы, продолжительность их воздействия и масштабы);

частоты или вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций по каждому из выбранных расчетных сценариев; границы зон, в пределах которых может осуществляться поражающее воздействие источника чрезвычайной ситуации;

распределение людей (производственного персонала и населения) на территории, в пределах которой может осуществляться поражающее воздействие источника чрезвычайной ситуации.

Важным документом, который внес упорядочивание в понятийный аппарат теории безопасности, является Федеральный закон от 8 марта 2015 г. N 38-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера". В нем уточнены такие важные понятия как критически важный объект (КВО), который определяется как «объект, нарушение или прекращение функционирования, которого приведет к потере управления экономикой Российской Федерации, субъекта Российской Федерации или административно-территориальной единицы субъекта Российской Федерации, ее необратимому негативному изменению (разрушению) либо существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения.

Также дано определение ПОО как объекта, на котором расположены здания и сооружения повышенного уровня ответственности, либо объект, на котором возможно одновременное пребывание более пяти тысяч человек» [2].

В работе проведено упорядочивание понятийного аппарата, связанного с оценкой опасности ТА, как источника ЧС. В таблице 1.1 представлен систематизированный перечень основных понятий и терминов и определений в области безопасности в ЧС, связанной с исследованием ТА на потенциально опасных и критически важных объектах. Большинство терминов в области безопасности в ЧС даны в интерпретации ГОСТа или Федеральных законов (ФЗ). Ряд понятий уточнено и дано в авторской редакции.

Таблица 1.1 - Систематизированный перечень основных терминов и определений в области безопасности потенциально опасных объектов техносферы

№ п/п	Термин	Определение	Источник и комментарии
1.	РСЧС — единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций Российской Федерации	Объединение органов управления, сил и средств федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления и организаций, в полномочия которых входит решение вопросов по защите населения и территорий (акваторий) от чрезвычайных ситуаций	ГОСТ Р 22.0.02-94 (Изменение №1, принято 31.05.2000, № 148-ст) [3]

Продолжение таблицы 1.1

2.	Чрезвычайная ситуация	Обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей	Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [4]
3.	Предупреждение чрезвычайных ситуаций	Комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь в случае их возникновения	Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [4]
4.	Ликвидация чрезвычайных ситуаций	Аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении чрезвычайной ситуации и направленные на спасение жизни, и сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь, а также на локализацию зон чрезвычайных ситуаций, прекращение действия характерных для них опасных факторов	Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [4]
5.	Прогнозирование чрезвычайных ситуаций	Опережающее отражение вероятности возникновения и развития чрезвычайной ситуации на основе анализа возможных причин ее возникновения, ее источника в прошлом и настоящем	ГОСТ Р 22.1.02-95

Продолжение таблицы 1.1

6.	Источник чрезвычайной ситуации	Опасное природное явление, авария или опасное техногенное происшествие, широко распространенная инфекционная болезнь людей, сельскохозяйственных животных и растений, а также применение средств поражения, в результате чего произошла или может возникнуть чрезвычайная ситуация	ГОСТ Р 22.0.02-94 [3]
7.	Опасность	Определяется как потенциальная или реализованная возможность появления у персонала и населения поражений различной степени тяжести, разрушения зданий, строений и объектов инфраструктуры, а также повреждения технологического оборудования, техники и т.п. в результате техногенной аварии	Кармишин А.М. [223, 227]
8.	Опасность	Наблюдаемое при функционировании человекомашинных систем их свойство представлять реально предсказуемую возможность причинения ущерба	Справочник МЧС
9.	Опасность аварии	Возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде вследствие разрушения сооружений и (или) технических устройств, взрыва и (или) выброса опасных веществ на ОПО. Опасность аварии на ОПО обусловлена наличием на них опасных веществ, энерго-массообменными свойствами технологических процессов, ошибками проектирования, строительства и эксплуатации, отказами технических устройств и их систем, а также нерасчетными (запроектными) внешними природными, техногенными и антропогенными воздействиями на ОПО	Приказ Ростехнадзора №144

Продолжение таблицы 1.1

10.	Безопасность	Состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз	Закон Российской Федерации от 05 марта 1992 г. № 2446-1 «О безопасности» (не действует)
11.	Безопасность	Совокупность условий и факторов, обеспечивающих защищенность человека, социума и окружающей среды от природных, техногенных и социальных катаклизмов, катастроф и действий, способных нанести им неприемлемый ущерб	Музалевский А.А., Карлин Л.Н. Экологические риски: теория и практика. СПб. РГГМУ, 2011. С 21
12.	Угроза безопасности	Совокупность условий и факторов, создающих опасность жизненно важным интересам личности, общества и государства	Закон Российской Федерации от 05 марта 1992 г. № 2446-1 «О безопасности»
13.	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Состояние защищенности населения, объектов экономики и окружающей природной среды от опасностей в чрезвычайных ситуациях	ГОСТ Р 22.0.02-94 [3]
14.	Обеспечение безопасности в чрезвычайных ситуациях	Принятие и соблюдение правовых норм, выполнение эколого-защитных, отраслевых или ведомственных требований и правил, а также проведение комплекса организационных, экономических, эколого-защитных, санитарно-гигиенических, санитарно-эпидемиологических и специальных мероприятий, направленных на обеспечение защиты населения, объектов экономики и иного назначения, окружающей природной среды от опасностей в чрезвычайных ситуациях	ГОСТ Р 22.0.02-94 [3]
15.	Правовое обеспечение безопасности в чрезвычайных ситуациях	Система нормативно-правовых гарантий надлежащего функционирования систем безопасности и регулирования правовых норм в сфере предупреждения, прогнозирования и ликвидации чрезвычайных ситуаций	Правовые основы обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях/ П.П. Бутков, А.Ю. Туманов, Ю.А. Левченко – СПб. 2012.– С10

Продолжение таблицы 1.1

16.	Промышленная безопасность опасных производственных объектов	Состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий	Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»
17.	Радиационная безопасность населения	Состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения	Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» [49]
18.	Экологическая безопасность	Состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий	Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [159]
19.	Безопасность гидротехнических сооружений	Свойство гидротехнических сооружений, позволяющее обеспечивать защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов	Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений»
20.	Защищенность в чрезвычайных ситуациях	Состояние, при котором предотвращают, преодолевают или предельно снижают негативные последствия возникновения потенциальных опасностей в чрезвычайных ситуациях для населения, объектов экономики и окружающей природной среды	ГОСТ Р 22.0.02-94 [3]
21.	Защищенность объекта	Совокупность организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение охраны объекта (зоны объекта)	ГОСТ Р 50776-95

Продолжение таблицы 1.1

22.	Защита населения в чрезвычайных ситуациях	Совокупность взаимосвязанных по времени, ресурсам и месту проведения мероприятий РСЧС, направленных на предотвращение или предельное снижение потерь населения и угрозы его жизни и здоровью от поражающих факторов и воздействий источников чрезвычайной ситуации	ГОСТ Р 22.0.02-94[3]
23.	Объект защиты	Здание, сооружение, помещение, процесс, технологическая установка, вещество, материал, транспортное средство, изделия, а также их элементы и совокупности. В состав объекта защиты входит и человек	ГОСТ Р 12.1.004-91
24.	Инженерная защита	Комплекс инженерных сооружений, инженерно-технических, организационно-хозяйственных и социально-правовых мероприятий, обеспечивающих защиту объектов экономики и территории от затопления и подтопления, берегообрушения и оползневых процессов	СНиП 2.06.15-85
25.	Инженерная защита территорий, зданий и сооружений	Комплекс инженерных сооружений и мероприятий, направленных на предотвращение отрицательного воздействия опасных геологических и др. процессов на территорию, здания и сооружения, а также защиту от их последствий	СНиП 2.01.15-90
26.	Системы инженерной защиты территории от затопления и подтопления	Гидротехнические сооружения различного назначения, объединенные в единую территориальную систему, обеспечивающую инженерную защиту территории от затопления и подтопления	СНиП 2.06.15-85

Продолжение таблицы 1.1

27.	Средство коллективной защиты населения	Защитное сооружение, предназначенное для укрытия группы людей с целью защиты их жизни и здоровья от последствий аварий или катастроф на потенциально опасных объектах, либо стихийных бедствий в районах размещения этих объектов, а также от воздействия современных средств поражения	ГОСТ Р 22.0.02-94[3]
28.	Средства индивидуальной защиты населения	Предмет или группа предметов, предназначенных для защиты человека или животного от радиоактивных, опасных химических и биологических веществ и светового излучения ядерного взрыва	ГОСТ Р 22.0.02-94 [3]
29.	Риск	Вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда	Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. №184-ФЗ «О техническом регулировании» [186]
30.	Риск	Риск — сочетание вероятности нанесения ущерба и тяжести этого ущерба	Руководство ИСО/МЭК 51:1999 "Аспекты безопасности. Руководящие указания по включению их в стандарты". На основании последнего принят ГОСТ Р 51898-2002. Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты.

Продолжение таблицы 1.1

31.	Допустимый риск	Риск, который в данной ситуации считают приемлемым при существующих общественных ценностях	Руководство ИСО/МЭК 51:1999 "Аспекты безопасности. Руководящие указания по включению их в стандарты". На основании последнего принят ГОСТ Р 51898-2002. Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты.
32.	Приемлемый риск	Любая деятельность с уровнем риска в этой области является объектом надзора и контроля для регулирующего органа. Конкретное значение риска определяется, исходя из экономических и социальных условий для данного вида деятельности	Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004г. [94]
33.	Риск возникновения чрезвычайной ситуации (риск ЧС)	Вероятность или частота возникновения источника чрезвычайной ситуации, определяемая соответствующими показателями риска	Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004г. [94]
34.	Риск возникновения чрезвычайной ситуации	Вероятность или частота возникновения источника чрезвычайной ситуации, определяемая соответствующими показателями риска	ГОСТ Р 22.0.02-94 [3]

Продолжение таблицы 1.1

35.	Лицо, управляющее риском	Физическое лицо, имеющее документы в соответствии с законодательством Российской Федерации о получении им профессиональных знаний в области оценки риска ЧС и непосредственно выполняющее работы по оценке риска ЧС	Туманов А.Ю. (2017)
36.	Ущерб	Потери некоторого субъекта или группы субъектов, части или всех своих ценностей	ГОСТ Р 22.10.01-2001
37.	Ущерб полный	Сумма ущерба прямого и ущерба косвенного, а также затрат на ликвидацию последствий стихийных бедствий или аварий. У.п. определяется на конкретный момент времени и является промежуточным по сравнению с ущербом общим, который определяется количественно и качественно в отдаленной перспективе	Словарь терминов МЧС, 2010
38.	Ущерб прямой	Потери и убытки всех структур экономики, попавших в зону действия поражающих и вредных факторов опасного природного явления или аварии. Они складываются из невозвратных потерь основных фондов, оцененных природных ресурсов и убытков, вызванных этими потерями, т.е. недобора предприятиями прибыли, государством различных налогов и страховых выплат и пр. Величина ущерба определяется затратами на восстановление хозяйства или текущей рыночной стоимостью разрушенных (нарушенных) хозяйственных объектов. Сюда относятся затраты на выплаты по страхованию имущества, выплаты едино разовых денежных пособий, списание долгов, представление кредитов с меньшими процентными ставками и пр.	Словарь терминов МЧС, 2010

Продолжение таблицы 1.1

39.	Экономический ущерб от ЧС	Фактические экологические, экономические или социальные потери, возникшие в результате чрезвычайной ситуации. Ущерб проявляется в виде потерь природных, трудовых, материальных, финансовых ресурсов в народном хозяйстве, а также ухудшения социально-гигиенических условий проживания для населения и качественных изменений (потерь) экономического потенциала страны Он также может проявляться в виде убытков, опосредованных в следующих формах: потеря материальных благ или их потребительских свойств, созданных прошлым трудом; потеря (неполучение) потенциальных материальных благ или потребительских свойств; неполучение ожидаемого результата при неосуществленных затратах или потеря естественных природных благ; дополнительные затраты на компенсацию понесенных потерь; нерациональное использование наличных материальных и финансовых ресурсов	Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004г. [94]
40.	Ущерб экономический	Материальные потери и затраты, связанные с повреждениями (разрушениями) объектов производственной сферы экономики, ее инфраструктуры и нарушениями производственно-кооперационных связей	ГОСТ Р 22.0.11-99
41.	Ущерб предотвращенный.	Разность между ущербом, определенным без учета мероприятий по его предупреждению или снижению и ущербом с учетом этих мероприятий	ГОСТ Р 22.10.01-2001

Продолжение таблицы 1.1

42.	Ущерб предотвращенный	Несостоявшиеся гибель (утрата здоровья) людей, убытки населения, потери материальных и культурных ценностей и отсутствие других нежелательных изменений в результате заблаговременно проведенных мероприятий по предупреждению или уменьшению масштабов чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, защите населения, материальных и культурных ценностей от опасностей, возникающих при ведении военных действий или вследствие этих действий; определяется расчетным путем как разность между ущербом, определенным без учета мероприятий по его предупреждению или снижению и ущербом с учетом этих мероприятий или разность между возможным и фактическим ущербом в определенный момент времени в данном регионе	Словарь терминов МЧС, 2010
43.	Предотвращенный ущерб от ЧС	Представляет собой оценку в денежной форме возможных отрицательных последствий, которые удалось избежать (предотвратить, не допустить) в результате деятельности территориальных органов РСЧС, осуществления мероприятий и программ, направленных на снижение риска и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций. Предотвращенный ущерб имеет место в результате осуществления какого-либо превентивного мероприятия, снижающего риск возникновения ЧС и представляет собой разницу между возможным и фактическим ущербами в определенный момент времени	Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004г. [94]

Продолжение таблицы 1.1

44.	Субъект ущерба	Конкретное физическое (человек) или юридическое (предприятие, территориальная организация, государство в целом и т.п.) лицо, на которое воздействовала ЧС. При определении государства как субъекта ущерба исходят из его функций, определяемых Конституцией и Гражданским кодексом Российской Федерации	Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004г. [94]
45.	Предотвращенный ущерб от ЧС	Оцененные в стоимостной денежной форме возможные предотвращенные неблагоприятные последствия ЧС, в результате деятельности ЛУР и осуществления мероприятий, направленных на снижение опасности	Туманов А.Ю., 2017
46.	Ущерб социальный	Безвозвратные и санитарные потери людей, материальные потери личной собственности, затраты на лечение пострадавших и на восстановление трудоспособности, морально-психологические издержки и снижения уровня жизни	ГОСТ Р 22.0.11-99
47.	Ущерб экологический	Ущерб, нанесенный окружающей природной среде	ГОСТ Р 22.0.11-99
48.	Потенциально опасный объект	Объект, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют радиоактивные, пожаровзрывоопасные, опасные химические и биологические вещества, создающие реальную угрозу возникновения источника чрезвычайной ситуации	ГОСТ Р 22.0.02-94

Продолжение таблицы 1.1

49.	Потенциально опасный объект	Объект, на котором расположены здания и сооружения повышенного уровня ответственности, либо объект, на котором возможно одновременное пребывание более пяти тысяч человек"	Федеральный закон "О внесении изменений в Федеральный закон "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" от 08.03.2015 N 38-ФЗ (последняя редакция) [2]
50.	Критически важный объект	Объект, нарушение или прекращение функционирования, которого приведет к потере управления экономикой Российской Федерации, субъекта Российской Федерации или административно-территориальной единицы субъекта Российской Федерации, ее необратимому негативному изменению (разрушению) либо существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения	Федеральный закон "О внесении изменений в Федеральный закон "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" от 08.03.2015 N 38-ФЗ (последняя редакция) [2]
51.	Опасный производственный объект	Предприятие или цех, участок, площадка, а также иной производственный объект, указанный в приложении 1 к Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»	Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»
52.	Радиационно опасный объект	Объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют радиоактивные вещества, при аварии на котором или его разрушении может произойти облучение ионизирующим излучением или радиоактивное загрязнение людей, сельскохозяйственных животных и растений, объектов экономики, а также окружающей природной среды	ГОСТ Р 22.0.05-94

Продолжение таблицы 1.1

53.	Химически опасный объект	Объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют опасные химические вещества, при аварии на котором или при разрушении которого может произойти гибель или химическое заражение людей, сельскохозяйственных животных и растений, а также химическое заражение окружающей природной среды	ГОСТ Р 22.0.05-94
54.	Пожаровзрывоопасный объект	Объект, на котором производят, используют, перерабатывают, хранят или транспортируют легковоспламеняющиеся и пожаровзрывоопасные вещества, создающие реальную угрозу возникновения техногенной чрезвычайной ситуации	ГОСТ Р 22.0.05-94
55.	Опасный груз	Опасное вещество, материал, изделие и отходы производства, которые вследствие их специфических свойств при транспортировании или перегрузке могут создать угрозу жизни и здоровью людей, вызвать загрязнение окружающей природной среды, повреждение и уничтожение транспортных сооружений, средств и иного имущества	ГОСТ Р 22.0.05-94
56.	Опасное природное явление	Событие природного происхождения или результат деятельности природных процессов, которые по своей интенсивности, масштабу распространения и продолжительности могут вызвать поражающее воздействие на людей, объекты экономики и окружающую природную среду	ГОСТ Р 22.0.03-95

Продолжение таблицы 1.1

57.	Опасное геологическое явление	Событие геологического происхождения или результат деятельности геологических процессов, возникающих в земной коре под действием различных природных или геодинамических факторов, или их сочетаний, оказывающих или могущих оказать поражающие воздействия на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую природную среду	ГОСТ Р 22.0.03-95
58.	Опасное гидрологическое явление	Событие гидрологического происхождения или результат гидрологических процессов, возникающих под действием различных природных или гидродинамических факторов, или их сочетаний, оказывающих поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую природную среду	ГОСТ Р 22.0.03-95
59.	Опасное метеорологическое явление	Природные процессы и явления, возникающие в атмосфере под действием различных природных факторов или их сочетаний, оказывающие или могущие оказать поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую природную среду	ГОСТ Р 22.0.03-95

Продолжение таблицы 1.1

60.	Терроризм	Насилие или угроза его применения в отношении физических лиц или организаций, а также уничтожение (повреждение) или угроза уничтожения (повреждения) имущества и других материальных объектов, создающие опасность гибели людей, причинения значительного имущественного ущерба либо наступления иных общественно опасных последствий, осуществляемые в целях нарушения общественной безопасности, устрашения населения или оказания воздействия на принятие органами власти решений, выгодных террористам, или удовлетворения их неправомерных имущественных и (или) иных интересов; посягательство на жизнь государственного или общественного деятеля, совершенное в целях прекращения его государственной или иной политической деятельности либо из мести за такую деятельность; нападение на представителя иностранного государства или сотрудника международной организации, пользующихся международной защитой, а равно на служебные помещения либо транспортные средства лиц, пользующихся международной защитой, если это деяние совершено в целях провокации войны или осложнения международных отношений	Федеральный закон от 25 июля 1998 г. № 130-ФЗ «О борьбе с терроризмом», Федеральный закон от 06 марта 2006 №35-ФЗ «О противодействии терроризму» в редакции Федеральных законов от 27.07.2206 №153-ФЗ, от 08.11.2208 №203-ФЗ, от 22.12.2008 №272-ФЗ, от 30.12.2008 №321-ФЗ, от 27.07.2010 №197-ФЗ
61.	Объекты охраняемые	Здания, строения, сооружения, прилегающие к ним территории и акватории, транспортные средства, а также грузы, в том числе при их транспортировке, денежные средства и иное имущество, подлежащие защите от противоправных посягательств	Федеральный закон от 14 апреля 1999 г. № 77 – ФЗ «О ведомственной охране»

Продолжение таблицы 1.1

62.	Критически важные объекты Российской Федерации	Объекты, нарушение (или прекращение) функционирования которых приводит к потере управления, разрушению инфраструктуры, необратимому негативному изменению (или разрушению) экономики страны, субъекта или административно-территориальной единицы, или существенному ухудшению безопасности жизнедеятельности населения, проживающего на этих территориях на длительный период времени	Принято на заседании межведомственной координационной группы по решению ключевых проблем обеспечения защищенности населения страны и критически важных для национальной безопасности объектов инфраструктуры от угроз техногенного, природного характера и террористических проявлений (протокол №1 от 27 апреля 2004 г.).
63.	Критически важный объект	объект, нарушение или прекращение функционирования, которого приведет к потере управления экономикой Российской Федерации, субъекта Российской Федерации или административно-территориальной единицы субъекта Российской Федерации, ее необратимому негативному изменению (разрушению) либо существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения	Федеральный закон от 8 марта 2015 г. N 38-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера"[2]
64.	Техносфера	Техносфера — совокупность технологий и связанных с ними общественных отношений	Теоретические аспекты и основы экологической проблемы: толкователь слов и идиоматических выражений

Продолжение таблицы 1.1

65.	Техносфера	Техносфера — область действительности, для которой характерно применение техники. В более узком смысле понятие Т., появившееся в 40-50-е гг. в работах социологов техники как отклик на НТР, употребляется при характеристике современной цивилизации, для которой специфично проникновение сложной машинной техники во все сферы деятельности. Техносфера (от греч. téchne – искусство, мастерство, умение), совокупность искусственных объектов в пределах географической оболочки Земли (здания, сооружения, механизмы и др.), созданных человеком из вещества окружающей его неживой природы	Географический энциклопедический словарь
66.	Техника	Те́хника (др.-греч. Τεχνικός от τέχνη – искусство, мастерство, умение) – это общее название различных приспособлений, механизмов и устройств, не существующих в природе и изготовляемых человеком. Техника (от греч. téchne – искусство, мастерство, умение), совокупность средств человеческой деятельности, создаваемых для осуществления процессов производства и обслуживания непроизводственных потребностей общества	Большая Советская энциклопедия
67.	Техническая авария	Нарушение работоспособности оборудования без образования поражающих факторов	А.М. Кармишин [222]
68.	Техногенная авария	Нарушение работоспособности оборудования с образованием поражающих факторов	А.М. Кармишин [222]

Продолжение таблицы 1.1

69.	Эксперт по оценке ущерба	Физическое лицо, имеющее документы в соответствии с законодательством Российской Федерации о получении им профессиональных знаний в области оценки ущерба от ЧС и непосредственно выполняющее работы по оценке ущерба от ЧС	Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004г. [94]
70.	Дерево событий	Граф, отображающий логику развития аварии, используемый для моделирования аварийных последовательностей	Федеральная служба по экологическому, технологическому И атомному надзору Приказ От 10 февраля 2017 г. N 51 Об утверждении руководства по безопасности При использовании атомной энергии "рекомендации к разработке Вероятностного анализа безопасности для хранилищ Отработавшего ядерного топлива"
71.	Эффект воздействия ПФ источника ЧС	Результат воздействия ПФ источника ЧС на технический объект в виде его повреждения или разрушения, который может быть объективно измерен, приводящий к полному и частичному снижению защищённости (стойкости) объекта	Туманов А.Ю. (2019)

Предложенный перечень основных понятий для оценивания опасности ТА как источника ЧС не является исчерпывающим, но закладывает основу теории воздействия ПФ источников ЧС на ПОО и КВО.

1.2 Основные проблемы обеспечения безопасности плавучих атомных станций как объектов воздействия поражающих факторов источников ЧС

Дадим краткую характеристику ядерной и радиационной безопасности арктический зоны России (АЗРФ). Как представлено в [5] на территории АЗРФ (рис.1), омываемых Баренцевым, Карским и Белым, Лаптевых, Восточно-сибирским, Чукотским и Беринговым морями сосредоточено большое количество объектов энергетики морского базирования, использующих радиоактивные материалы.

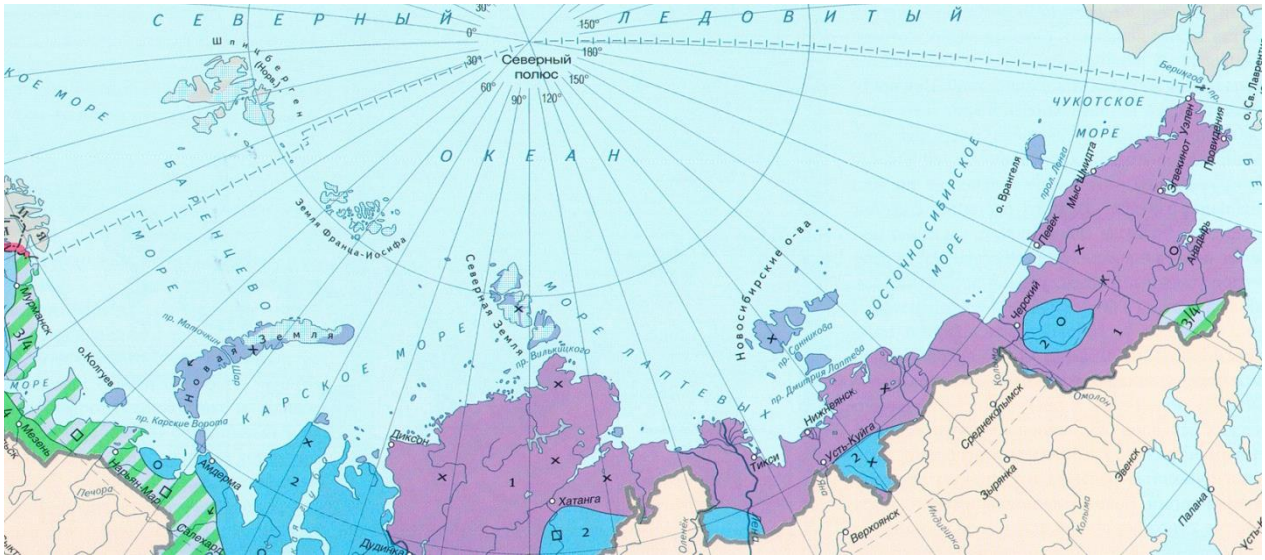

Рис. 1.1 –АЗРФ России [242]

«Это Кольская АЭС (4 блока с реакторами ВВЭР-440), Билибинская АЭС, судостроительные и судоремонтные заводы по строительству и ремонту кораблей и судов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ), атомный ледокольный флот, Северный ВМФ (на котором более 60% всех кораблей с ЯЭУ, несущих ядерное оружие) и инфраструктура по их обслуживанию. Объекты и инфраструктура атомного флота включает в свой

состав, в первую очередь, атомные подводные лодки (АПЛ) и надводные корабли (НК), атомные ледоколы (АЛ), лихтеровозы, суда атомно-технологического обслуживания (АТО), а также пункты базирования флота, береговые (БТБ) и плавучие технические базы, базы технического имущества, временные пункты перевалки отработавшего (облученного) ядерного топлива (ОЯТ) и пункты базирования АПЛ отстоя и утилизации» [5]. Научный интерес для исследования оценки опасности чрезвычайных ситуаций потенциально опасных объектов морского базирования представляют атомный флот (АЛ, АПЛ) транспортабельные атомные энергетические установки (ТАУ), плавучие энергоблоки (ПЭБ), атомные станции малой мощности (АСММ), плавучие атомные тепловые электростанции (ПАТЭС), плавучие энергоблоки (ПЭБ) проекты которых находятся в стадии реализации. Из всего этого многообразия выделим для нашего непосредственного рассмотрения объект — ПАТЭС (включающий в себя ПЭБ), который одновременно сочетает в себе транспортное средство морской индустрии для перевозки РМ (атомное судно) [20, 121, 122] по северному морскому пути и объект атомной и тепловой энергетики и как потенциально опасный объект.

Известно, что с 1972 года АО «ОКБМ Африкантов» ведет разработки проектов реакторных установок малой мощности [7], которые позволяют эффективно решать проблемы обеспечения энергоснабжения удаленных районов с децентрализованным электроснабжением и дорогим топливом.

Одним из примеров таких разработок является ПЭБ (рис.2). Это «энергетический объект, который целиком создается на судостроительном заводе как готовое изделие (несамоходное судно) и затем буксируется морским путем к месту его эксплуатации. ПЭБы разработаны для эксплуатации в труднодоступных районах АЗРФ и способны выдерживать экстремальные условия окружающей среды.

Рис. 1.2 – ПЭБ «Академик Ломоносов» [224]

Кроме того, оборудование ПЭБ, как утверждают разработчики проекта, отвечает всем требованиям по надежности и безопасности, в том числе рекомендациям по ядерной и радиационной безопасности Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ)» [224].

Таким образом, в России ПЭБ востребован, прежде всего, в районах Крайнего Севера и Дальнего Востока, которые не охвачены единой энергетической системой и нуждаются в надежных и экономически приемлемых источниках энергии. ПЭБ может использоваться в составе водоопреснительного комплекса, в этом случае применяются либо технология обратного осмоса (RO), либо многоступенчатые испарительные установки (MED). Интерес к таким комплексам проявляют многие страны Африки, Азии и Европы, испытывающие острый дефицит пресной воды.

«ПЭБ проекта 20870 [75,76,77] предназначен для работы в составе ПАТЭС. ПАТЭС (рис. 3) состоит из гладкопалубного несамоходного судна (длиной – 144 метра, шириной – 30 метров, водоизмещением – 21,5 тысячи тонн) и комплекса береговых гидротехнических сооружений.

Рис. 1.3 – Проект плавучей АТЭЦ (ПАТЭС) с реакторными установками КЛТ-40С [174]

4 октября 2016 года в городе Певек (Чукотский АО) состоялась торжественная церемония забивки первого (лидерного) шпунта в основание береговой инфраструктуры для ПЭБ «Академик Ломоносов». ПАТЭС оснащена двумя реакторными установками (РУ) КЛТ-40С, которые способны вырабатывать до 70 МВт электроэнергии и 50 Гкал/ч тепловой энергии в номинальном рабочем режиме, что достаточно для поддержания жизнедеятельности города с населением около 100 тыс. человек. Главным конструктором, изготовителем и поставщиком РУ является АО «ОКБМ Африкантов». Концерн «Росэнергоатом» в соответствии с графиком строительства береговых сооружений ориентирован на срок ввода плавучей станции в эксплуатацию в 2019 году» [24].

«Планируется, что к 2021-му ПАТЭС выйдет на полную мощность, заменив Билибинскую АЭС, которую к этому сроку выведут из эксплуатации. ПЭБ «Академик Ломоносов» является самой северной в мире атомной станцией, расположенной в зоне вечной мерзлоты. Учитывая, что ПЭБ «Академик Ломоносов» является головным, начало его эксплуатации позволит говорить о практическом использовании атомной энергии для обеспечения теплом и энергией отдаленных районов. Накопленный опыт АО ОКБМ «Африкантов» в части судовых реакторов, позволяет создавать реакторные установки для плавучих атомных энергоблоков мощностью от 3,5 до 70 МВт (эл.) и более. «Участниками проекта создания плавучей АЭС являются:

АО "Концерн Росэнергоатом" — заказчик;

ЗАО «Атомэнерго» — генеральный проектировщик ПАТЭС;

ОАО ЦКБ «Айсберг» — проектировщик плавучего энергоблока;

ООО «БАЛТИЙСКИЙ ЗАВОД-СУДОСТРОЕНИЕ» — изготовление судна;

АО «ОКБМ Африкантов» — комплектный поставщик реакторных установок;

ОАО «Калужский турбинный завод» — изготовление турбин.

На сегодняшний день существует более 20 концепций и проектов отечественных АСММ, находящихся на различных стадиях реализации. Практическую реализацию и поддержку со стороны государства получили:

проект плавучей АТЭЦ (ПАТЭС) с реакторными установками КЛТ-40С;

проект АТЭЦ с блочной транспортабельной установкой СВБР-100 (ранее проект назывался «Ангстрем», была увеличена единичная мощность до 100 Мвт(э))» [24].

Программа деятельности Госкорпорации «Росатом» на долгосрочный период предусматривает проведение мероприятий в части разработки и

строительства АСММ с реакторными установками типа КЛТ-40С. В 2013 году строительство головной ПАТЭС «Академик Ломоносов» перешло в завершающую стадию. Произведена погрузка парогенерирующих блоков в реакторные отсеки плавучего энергоблока, ведется монтаж электротехнического оборудования. Ожидается, что ввод в эксплуатацию ПАТЭС состоится в 2021 году после двух лет опытной эксплуатации. Окончательным местом размещения выбран город Певек. Реакторная установка ПАТЭС – КЛТ-40С является серийным блочным реактором, применяемым на атомных ледоколах и судах морского флота. Она модифицирована для плавучих и наземных АСММ. Технология полной заводской готовности ПАТЭС позволяет сократить сроки строительства, обеспечить контроль качества в заводских условиях, минимизировать воздействие на окружающую среду – в ходе как строительства, так и эксплуатации станции. В процессе эксплуатации предусматриваются два средних ремонта через каждые 12 лет, на время которых плавэнергоблок будет уходить на докование на 2 года для замены выработавшего свой ресурс оборудования и перегрузки топлива. Общий срок эксплуатации плавэнергоблока составит 36 лет (3 цикла по 12 лет).

Мультимодальные перевозки РМ. АЗРФ непосредственно связана с морской транспортной индустрией и чрезвычайно насыщена ПОО, являющимися потенциальным источником опасности, что может привести к возникновению ЧС в результате ТА. В случае ПОО морской индустрии имеется усложненная совокупность причин и источников ЧС, т.к. на проблемы оценки опасности на морском транспорте накладываются проблемы оценки радиационной опасности, например, в случае ПАТЭС. В соответствии с действующей терминологией и постановлением правительства РФ от 19 июля 2007 г. N 456 Об утверждении правил физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов «транспортирование опасного груза —

радиоактивного материала (РМ) представляет собой перемещение, включая использование различных транспортных средств и его перегрузку, начиная с его отправления с ЯУ (пункта хранения отправителя) и заканчивая прибытием на ЯУ (пункт хранения получателя)». В качестве РМ в работе рассматриваются ЖРО. Процесс транспортирования РМ включает в себя следующие этапы МП:

погрузка РМ на судно в морском порту (портовом средстве);

перевозка на морском судне;

перегрузка груза РМ с судна на железнодорожный транспорт;

перевозка РМ железнодорожным транспортом до места назначения.

Анализ обеспечения безопасности ПАТЭС. «Приведенная зарубежная статистика показала, что в США с 1997 по 2011 год произошло 128 радиационных аварий с грузами РМ (1 смерть, 1 случай вреда здоровью, ущерб $ 2,2 млн.). Со всеми опасными грузами (ОГ) произошло 170 493 аварий (5 052 серьезных, 138 смерти, 2 825 случаев вреда здоровью, ущерб $ 635,58 млн. В Великобритании за 1958– 2008 гг. произошло 913 инцидентов. За 2006–2008 гг. произошло 90 инцидентов. Во Франции за 1997–2007 гг. произошло более 900 событий, (аварий, инцидентов, происшествий)» [225].

Отечественная статистика менее доступна и обширна, однако в докладе ГК «Росатом» на Форуме в Санкт-Петербурге в 2015 г. были приведены данные по 33 авариям при транспортировке РМ. Наиболее нагляден и показателен пример ТА на судне атомного флота плавучей технической базе «Лепсе» при перевозке РМ. Основными причинами ТА, выявленные при анализе ТА, явились:

ошибки при эксплуатации, в результате которых в процессе длительного хранения РМ (30–50лет) произошло коррозионное разрушение, сопровождаемое изменением геометрических размеров средств хранения РМ. На первое декабря 2010 г. расчетная величина радиоактивности продуктов

деления составила $2{,}61 \cdot 10^{16}$ Бк. Эта величина примерно равна суммарной активности ядерных объектов и РАО, захороненных в Карском море [66].

Анализ статистики показал, что неблагоприятные события с РМ происходят на всех видах транспорта и этапах МП (перевозка, погрузка-разгрузка, хранение при транзите, перегрузка с одного вида транспорта на другой), что требует исследования причин возникновения ТА при транспортировании РМ.

Выбор объекта исследования — СХПЖРО в условиях действия ПФ источников ЧС на ПАТЭС был обусловлен наличием потенциальной возможности радиационной аварии (РА) с выходом РМ в акваторию и нанесением ущерба как персоналу, населению так и окружающей среде.

С одной стороны, в ряде работ экологических организаций — противников строительства АС выдвигаются предположения, что эксплуатация ПАТЭС небезопасна [20], особенно в области пожаро-взрывобезопасности и радиационной безопасности [52, 53]. Однако степень опасности либо декларируется, либо оценивается на качественном уровне. С другой стороны, в отчетах о безопасности разработчиков ПАТЭС степень опасности ТА оценивается как невысокая и не рассматриваются запроектные аварии по ряду маловероятных, но чрезвычайно опасных сценариев. Если первые оперируют, в основном, экспертными и качественными оценками опасности, вторые детерминированными и вероятностными оценками, но в рамках узковедомственных нормативов. Однако, нет объективной оценки опасности по всему жизненному циклу (ЖЦ) МП РМ и учета комбинированного действия ПФ источников ЧС.

Обеспечение безопасности при эксплуатации ПЭБ

С одной стороны, создание ПАТЭС отлично решает проблему обеспечения электроэнергией труднодоступных районов. Это инновационный проект, который в будущем может принести огромную экономическую прибыль. Тем не менее данный проект связан с огромными

рисками в области безопасности [52, 53]. Во-первых, «технологии, которые используются в РУ и в другом оборудовании АС, являются несколько устаревшими, а техническая надежность эксплуатируемого оборудования недостаточно высокая. Это подтверждает статистика радиационных инцидентов и аварий при эксплуатации атомных ледоколов, атомных подводных лодок» [20]. Во-вторых, распространение по миру ПАТЭС создает угрозу совершения террористических атак и открывает широкие возможности тем, кто охотится за РМ и технологиями. В связи с этим, необходимо тщательно продумать особые меры безопасности не только в пределах размещения АС, но и в международном масштабе. Поэтому потенциальные частные и государственные инвесторы должны осознавать, с какими трудностями они могут столкнуться, если согласятся участвовать в этом проекте.

Согласно проекту «радиационная безопасность населения и территорий, гарантируемая ПАТЭС, соответствует опасности аварии четвертого уровня. Это авария с локальными последствиями согласно международной шкалы ядерных событий (INES, сокр. International Nuclear Event Scale) Однако, если жертв радиационной аварии три и более, то уровень опасности поднимается на одну ступень. Если тридцать и более, то на две ступени» [54].

С другой стороны, на ПАТЭС используется оборудование, которое обладает «высокой ударостойкостью, поскольку за ним стоят проверенные практикой корабельные прототипы. Это позволяет размещать станции практически в любых сейсмоопасных районах, где расчетное землетрясение может достигать 9 баллов по шкале MSK-64» [24].

Гидротехнические сооружения для закрепления ПЭБ, построенные в составе ПАТЭС, распложены в проливе Певек в Чаунской губе Восточно - Сибирского моря. Общие требования к составу и свойствам воды, содержанию загрязнений в поверхностном водном объекте

регламентируются установленными нормативами (ПДК), которые утверждены Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [41].

В соответствии с Водным Кодексом Российской Федерации размер водоохранной зоны морей составляет 500 м. В границах водоохранных зон устанавливаются прибрежные защитные полосы, на территориях которых вводятся дополнительные ограничения хозяйственной и иной деятельности, в том числе и в период строительства. Размер защитной прибрежной полосы составляет 50 м. В соответствии со ст. 65 Водного Кодекса «в границах водоохранных зон допускаются проектирование, размещение, строительство, реконструкция, ввод в эксплуатацию, эксплуатация хозяйственных и иных объектов при условии оборудования таких объектов сооружениями, обеспечивающими охрану водных объектов от загрязнения в соответствии с водным законодательством и законодательством в области охраны окружающей среды» [8].

Критерием качества состояния атмосферного воздуха являются гигиенические нормативы — ПДК загрязняющих веществ, установленные для населенных мест согласно ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы» [30].

В соответствии с СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест», «допустимое воздействие в жилой зоне и на других территориях проживания не должно превышать значение ПДК» [29].

Санитарно-гигиенические, организационные и технические требования по обеспечению радиационной безопасности персонала и населения, защиты окружающей среды при работе плавучих и береговых объектов атомных

теплоэлектростанций малой мощности на базе плавучего энергоблока с корпусными водоводяными реакторами регламентируют:

Санитарные правила СП АТЭС-2003 [30];

Санитарные правила СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» [31];

Федеральный закон от 09.01.1996 N 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» [49];

Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» [45];

Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.24-03 «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций» [32];

Санитарные правила СП 2.6.1.45-03 «Обеспечение радиационной безопасности при проектировании, строительстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации атомных теплоэлектростанций малой мощности на базе плавучего энергетического блока СП АТЭС-2003» [33];

Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» [35].

Считается, что «принцип сбора и хранения жидких радиоактивных отходов, исключает возможность сброса ЖРО в окружающую среду при любых единичных отказах и ошибках оператора. Для сбора и выдачи ЖРО средней и низкой активности используются независимые трубопроводы. Передача ЖРО из одной цистерны в другую, а также выдача ЖРО за пределы ПЭБ производится только принудительно (с помощью электронасосов герметичного исполнения либо сжатого воздуха). Удаление ЖРО на другое судно или на берег осуществляется посредством съемных коммуникаций, исключающих протечки ЖРО. Оборудование поста выдачи ЖРО

препятствует разливу ЖРО при перекачке или при аварийных ситуациях, связанных с повреждением коммуникаций» [35].

Предусмотрены быстрозапорные разобщительные устройства для срочного перекрытия трубопроводов при разрыве или самопроизвольном разъединении съемных коммуникаций. В проекте ПАТЭС за счет внедрения новых технологий количество ЖРО сокращено в 3 раза по сравнению с прототипными установками атомных ледоколов. Все ЖРО, образующиеся на ПАТЭС, собираются в монжюсы. Сброс радионуклидов в забортное пространство полностью отсутствует, поэтому при поддержании штатных условий эксплуатации ПАТЭС непосредственное радиационное воздействие на акваторию отсутствует полностью. На ПЭБ предусмотрены хранилища для ТРО и ЖРО вместимость которых позволяет осуществлять их сбор и хранение за весь межремонтный период без их вывоза или переработку по месту эксплуатации.

Назначенный срок службы до заводского ремонта ПЭБ составляет 10 – 12 лет; Выдача жидких и твердых радиоактивных отходов для переработки и захоронения в период заводского ремонта осуществляется в соответствии с Договором, заключенным с ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». На территории береговой площадки ПАТЭС хранение радиоактивных сред и обращение с ядерными материалами и радиационно-опасными средами не предусматривается, за исключением доставки на ПАТЭС один раз в 3 — 4 года новых тепловыделяющих сборок (НТВС) для перезагрузки РУ.

Между топливной композицией активной зоны и окружающей средой на пути возможного распространения радиоактивных веществ предусмотрен последовательный ряд контролируемых независимых физических и локализующих барьеров, к которым предъявляются жесткие требования по степени их герметичности.

Предел повреждений первого (после топливной композиции)

защитного барьера – оболочек ТВЭЛов – контролируется нормированием объемной активности теплоносителя первого контура, постоянно измеряемой средствами системы и радиационного технологического контроля (РТК).

Второй защитный барьер — I контур — герметичен при эксплуатации и защищен от разрушения системами безопасности. Контроль за герметичностью всего тракта 1 контура постоянно осуществляется средствами системы РТК.

Степень негерметичности третьего защитного барьера – защитной оболочки – определяется скоростью утечки паровоздушной среды при максимальной проектной аварии и не превышает 1% объема в сутки.

Четвертый защитный барьер — защитное ограждение – окружает защитную оболочку и смежные с ней помещения и герметичен по отношению к помещениям станции и окружающей среде. Защитное ограждение служит для организации отвода возможных утечек летучих радиоактивных веществ из расположенных внутри него помещений и удаления их на фильтры по каналам вентиляции с обеспечением непрерывного контроля объемных и суммарных выбросов радиоактивности.

Помещения АС, в зависимости от допускаемого уровня проникающего ионизирующего излучения и исключения потенциальной возможности выноса радиоактивного загрязнения, разделены на санитарно-защитные зоны (контролируемую, наблюдаемую и свободную) с организацией санитарно-пропускного режима.

В таблице 1.2 приведены допустимые значения доз излучения в помещениях ПАТЭС.

В работе понятие «опасность» определяется как потенциальная или реализованная возможность появления у персонала и населения поражений различной степени тяжести, разрушения зданий, строений и объектов инфраструктуры, а также повреждения технологического оборудования, техники и т.п. в результате ТА.

Таблица 1.2 – Допустимые мощности доз излучения в помещениях ПАТЭС, мЗв/ч (мбэр/ч)

Помещения	Доза
Защитная оболочка	0,3(30)
Помещения контролируемой зоны, примыкающей к защитной зоне	0,03(3,0)
Места несения постоянных вахт	$0,75 \cdot 10^{-3}$(0,075)
Жилые и служебные помещения	$0,15 \cdot 10^{-3}$(0,015)
Под днищем станции в районе реактора	$7,5 \cdot 10^{-2}$(7,5)

В безопасности в ЧС принято выделять техническую аварию (технический отказ) технологического оборудования и техногенную аварию.

Классификация аварии по признаку «образование поражающих факторов» предполагает выделение двух классов аварий.

Техническая авария — нарушение работоспособности оборудования без образования поражающих факторов.

Техногенная авария — нарушение работоспособности оборудования с образованием поражающих факторов.

Так как поражающее действие ТА реализуется в пространстве и времени, то и показатели опасности должны учитывать эти два свойства.

Известно, что поражения персонала и населения, разрушение зданий строений, сооружений, повреждение технологического оборудования и других технических устройств, отраженные во многих нормативных документах условно классифицируют по степеням тяжести поражения:

I (легкая) — степень тяжести поражения (разрушения, повреждения);

II (средняя) — степень тяжести поражения (разрушения, повреждения);

III (тяжелая) — степень тяжести поражения (разрушения, повреждения);

IV (крайне тяжелая) — степень тяжести поражения (разрушения, повреждения).

Поражающее действие каждого физического ПФ определяется его количественной характеристикой, например, избыточным давлением во фронте ВУВ, скоростью осколка данной массы разрушенного технологического оборудования, интенсивностью теплового излучения и т.д. Более подробно оценка последствий действия ПФ источников ЧС на СХПЖРО детерминированными и вероятностными методами будет рассмотрено в следующих главах.

1.3 Анализ маршрутов МП РМ на ПАТЭС

Учитывая, что береговые и плавучие хранилища РМ военно-морского флота и гражданского атомного флота практически полностью заполнены [5], путь к местам захоронения от пункта дислокации ПАТЭС (рис.1.4) в п. Певек Чукотского автономного округа РФ составляет несколько тысяч километров морским и железнодорожным транспортом.

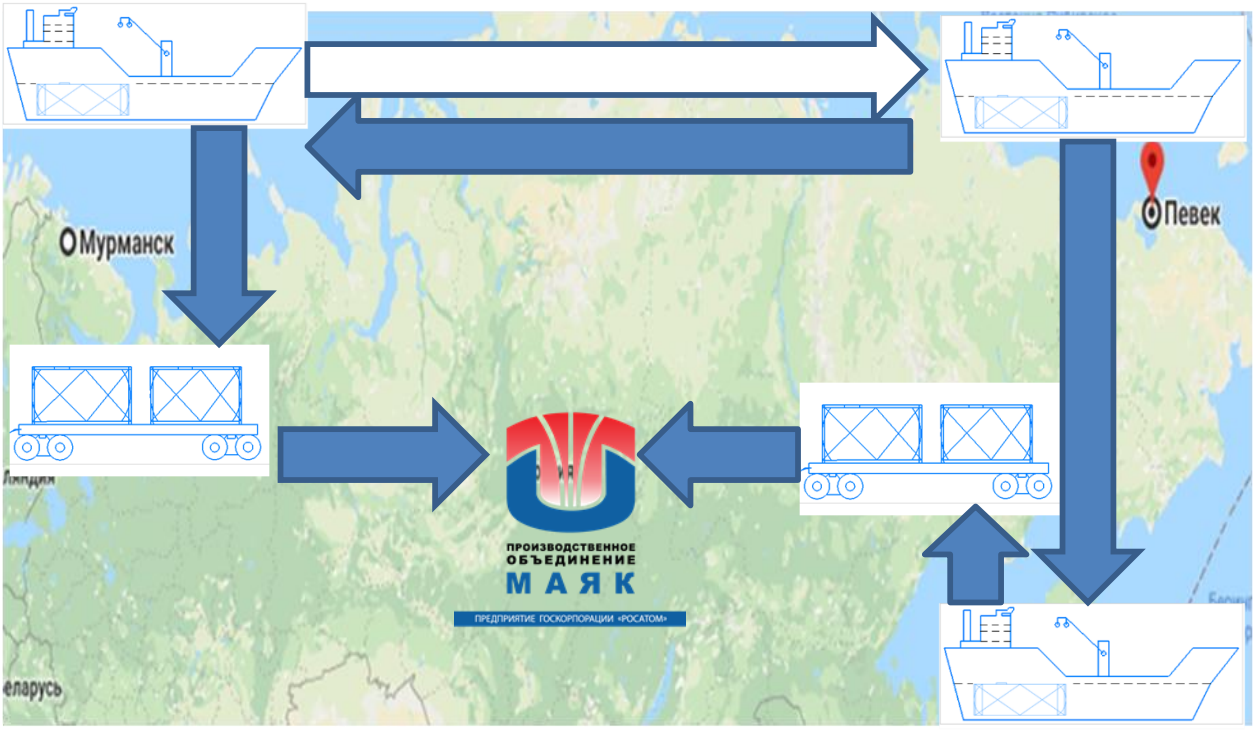

Рис. 1.4 - Схемы мультимодальной перевозки РМ на ПЭБ

Планируется, что транспортирование РМ морским путем производится на самом ПЭБ путем буксировки, а после перегрузки в порту, по железной дороге осуществляется «литерными вагон-контейнерными поездами в составе локомотива, вагонов сопровождения для размещения вооруженной охраны и обслуживающего персонала, вагонов прикрытия и вагонов РМ. Маршруты перемещения, в основном, проходят от АЭС до ПО «Маяк» и к ФГУП «ГХК» под Красноярском. Для транспортировки РМ используются специализированные модификации вагонов: В-60М2, В-60М2-МБ, 61-524, 61-524-МБ, 10-9960, 11-9873» [226]. Проведен анализ двух маршрутов МП РМ, на основании которого определен основной мультимодальный маршрут. Таким маршрутом определен маршрут по северному морскому пути (СМП) до г. Мурманск дальнейшая перевозка по железной дороге до места утилизации. Выбор маршрута был обоснован наличием сформированной инфраструктуры по перевозке и перегрузке РМ с одного вида транспорта на другой. Однако и этот маршрут таит в себе ряд опасностей природного характера, таких как воздействие низких температур и опасных природных явлений, техногенного характера (пожары, взрывы), террористического характера, вследствие удаленности и недостаточности защиты, которые могут потенциально привести к ТА.

1.4 Анализ причин аварийных ситуаций при перевозке РМ на ПАТЭС

Проведен анализ статистики аварий в морской индустрии (рис.1.5) и на атомных станциях, в ходе которого выявлены причины аварий и проведена их классификация. Проведен сравнительный анализ зарубежной статистики ТА и инцидентов при перевозке РМ в США, Великобритании, Франции.

Проведен анализ отечественной статистики радиационных аварий в России и проведена идентификация и классификация причин техногенных аварий на ПАТЭС.

Рис. 1.5 - Основные группы аварий на морском транспорте

По материалам годовых отчетов о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016-2017 году в таблице 1.3 представлено распределение нарушений по непосредственным причинам на атомных стациях [208].

Таблица 1.3 - Распределение нарушений по непосредственным причинам на атомных стациях

Причины аварийных ситуаций	**2016**	**2017**
Электрические явления, процессы, состояния	16	18
Механические явления, процессы, состояния	26	9
Гидравлические явления, процессы	9	1
Явления, процессы в контрольно-измерительных системах	9	4
Ошибочные действия обслуживающего персонала	6	3
Условия окружающей среды для АС	1	0

По материалам годовых отчетов о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016-2017 году в таблице 1.4 представлено распределение нарушений по коренным причинам на атомных станциях [208].

Таблица 1.4 – Распределение нарушений по коренным причинам на АС

Причины аварийных ситуаций	**2016**	**2017**
Ошибка конструирования	13	4
Ошибка проектирования	4	3
Дефект изготовления	10	9
Недостатки проектной, конструкторской и другой документации	2	4
Недостатки монтажа	5	2
Недостатки наладки	0	0
Недостатки управления и организации эксплуатации АС	25	11
Недостатки ремонта, выполняемого сторонними организациями	0	0

1.5 Поражающие факторы источников ЧС при ТА на ПАТЭС

Под «поражающим фактором источника чрезвычайной ситуации понимается материальная субстанция окружающей среды, изменившая свои свойства и оказывающая поражающее действие на различные объекты» [223, 227]. Изменения различных свойств окружающей среды можно достигнуть двумя принципиально различными способами: либо изменить свойства самой среды, либо внести в нее другую материальную субстанцию. Под изменением свойств окружающей среды предполагают:

Изменение свойств самой среды (ударная волна, избыточное давление во фронте ударной волны);

Внесение в среду другой материальной субстанции (АХОВ, ОВ, осколки).

ПФ источников ЧС при ТА на пожаро, взрыво и радиационно опасных объектах являются:

воздушная ударная волна (ВУВ);

осколки, образующиеся при взрыве;

тепловое излучение;

радиоактивное заражение, вследствие выброса (сброса) радиоактивности в окружающую среду.

В самом широком смысле слова под пораженным понимается объект, у которого в результате воздействия одного или нескольких поражающих факторов проявился заданный отрицательный отклик (эффект). Этот отрицательный отклик, который может быть объективно зафиксирован, свидетельствует о том, что объект перешёл в качественно иное состояние, в котором он не может полноценно функционировать [218, 222, 227].

В работе предложено определение эффектов для воздействия ПФ источников ЧС. Предлагается в общем случае использовать авторское определение эффекта, данного ранее в перечне терминов и понятий безопасности в ЧС в таблице 1.1.

Эффектом воздействия ПФ источника ЧС является результат воздействия ПФ источника ЧС на технический объект в виде его повреждения или разрушения, который может быть объективно измерен, приводящий к полному и частичному снижению защищённости (стойкости) объекта.

В качестве эффектов воздействия поражающих факторов на исследуемый в работе объект рассмотрено повреждение или разрушение СХПЖРО, а также изменение свойств окружающей среды, при котором происходит полное или частичное снижение защищенности (стойкости) защищаемого объекта.

1.6 Недостатки и пути совершенствования существующего научно-методического аппарата оценки изолированного и комбинированного действия физических ПФ источников ЧС при ТА при транспортировании РМ в МП

Человечество давно столкнулось с проблемой воздействия ПФ источников ЧС на различные объекты, поэтому проблема теоретического описания действия, в том числе и комбинированного, различных веществ, энергии и информации на технические объекты и живые организмы является одной из важнейших в защите в чрезвычайных ситуациях и имеет большое прикладное значение в различных сферах деятельности человечества. Особенно актуальна проблема описания комбинированного действия ПФ источников ЧС при ТА на радиационно, пожаро и взрывоопасных объектах.

Сегодня проблема оценки комбинированного действия ПФ начинает рассматриваться как важнейший аспект проектирования, создания и использования различных транспортных средств в морской индустрии, как наиболее уязвимых, что обуславливается, с одной стороны, сложностью структуры указанных объектов, а, с другой стороны, тем возможным ущербом, который может быть нанесен в случае ЧС, включая гибель экипажа транспортных средств, а также катастрофические последствия, связанные с повреждением перевозимых опасных грузов и влиянием на население и территории.

Несмотря на то, что имеется огромное количество данных по изолированному и комбинированному действию ПФ источников ЧС на различные объекты, до сих пор практически отсутствует их теоретическое обобщение и осмысление. До настоящего времени не решены вопросы, связанные с полным перечнем характеристик ПФ, особенно при их комбинированном действии. Вопросы обеспечения защиты от ПФ источников ЧС являются недостаточно разработанными. Наибольшие проблемы возникают при формулировании общетеоретических основ МР

защищенности объектов ПОО при ЧС техногенного характера. В связи с этим вопросы, разрабатываемые в рамках развития теории МР защищенности, представляют несомненный теоретический и практический интерес.

Основными недостатками существующего научно-методического аппарата оценки опасности являются:

недостаточная возможность учесть в оценке вероятности ТА комбинированность воздействия ПФ источников ЧС на объект;

нерешенность вопросов, связанные с полным перечнем характеристик ПФ источников ЧС при ТА;

недостаточная разработанность общетеоретических основ МР защищенности ПОО при ЧС техногенного характера;

недостаточная разработанность методик оценки показателей эффективности мероприятий по повышению защищенности объектов от ПФ источников ЧС.

Следует также учитывать сложность исследуемого технического энергонасыщенного ПОО — ПАТЭС, на ограниченном пространстве которого в силу конструктивных особенностей сосредоточены большое количество опасных веществ и энергии; высокой степенью уязвимости объекта к воздействию ПФ природного и техногенного характера при МП РМ в АЗРФ, недостаточной возможностью защиты расстоянием в связи с сосредоточенностью в ограниченном пространстве нескольких источников ЧС и конструктивными особенностями ПОО, особенно при комбинированном действии ПФ.

Рассмотренные выше актуальность, цель, объект и предмет диссертационного исследования позволяют сформулировать решаемую крупную научную проблему, имеющую важное социальное и хозяйственное значение, разработки научно-методического аппарата оценки защищенности СХПЖРО на ПАТЭС при МП РМ в условиях воздействия ПФ источников ЧС

и формирования требований по обеспечению их стойкости при различных вариантах использования средств и способов защиты.

Сформулируем основные положения диссертационного исследования.

Первое. Теоретические методы оценки изолированного действия физических поражающих факторов техногенной аварии при транспортировании радиоактивных материалов в МП.

Второе. Теоретические методы оценки комбинированного действия физических поражающих факторов при техногенной аварии при транспортировании радиоактивных материалов в МП.

Третье. Методика проведения испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной величины глубины внедрения в заданную преграду осколков разрушенных конструкций промышленного объекта.

Четвертое. Математические модели защищенности объектов и их элементов, раскрывающих зависимость между защитной способностью объекта, уровнем ПФ источника ЧС и параметрами состояния объекта, которые позволяют учитывать конструктивно-технические и эксплуатационно-технические факторы, влияющие на ее уровень.

Пятое. Математические модели эффективности мероприятий, раскрывающих зависимость между совокупными затратами на проведение мероприятий по предупреждению ЧС техногенного характера и предотвращенным ущербом от воздействия ПФ источников ЧС, которые позволяют обоснованно распределять ограниченные ресурсы по поддержанию уровня защищенности.

1.7 Выводы по главе 1

В первой главе освещены основные проблемы ПАТЭС, ПЭБ, СХПЖРО как ПОО воздействия ПФ источников ЧС. Рассмотрены и выбраны маршруты МП РМ в АЗРФ, идентифицированы и проанализированы

причины аварийных ситуаций при перевозке РМ, рассмотрены проблемы обеспечения защиты СХПЖРО при перевозке РМ в МП, проанализированы особенности физических ПФ источников ЧС при ТА, вскрыты недостатки и объективная необходимость поиска путей совершенствования существующего научно-методического аппарата оценки изолированного и комбинированного действия физических ПФ источников ЧС при ТА при транспортировании РМ в МП. Показана целесообразность решения приведенных научных задач на основе применения методов моделирования свойств СХПЖРО и воздействия ПФ на всем протяжении ЖЦ мультимодальной перевозки с целью поддержания СХПЖРО в состоянии готовности к выполнению задач безопасного хранения и перевозки РМ на базе защиты от ПФ источников ЧС. На основе проведенного анализа показано, что решение перечисленных выше задач невозможно без совершенствования научно-методического аппарата оценки МР защищенности СХПЖРО на ПАТЭС при МП в условиях воздействия ПФ источников ЧС и формирования требований по обеспечению их стойкости при различных конструктивных вариантах СХПЖРО и способов защиты; сформулированы научные положения диссертационных исследований, выносимые на защиту.

Для решения задач исследования необходимо провести анализ конструктивных особенностей СХПЖРО, влияющие на их поведение при аварийных режимах мультимодальной перевозки.

Глава 2 АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СХПЖРО, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ПЕРЕВОЗКИ

2.1 Основные характеристики ЖРО

Объёмы ЖРО на ПЭБ по данным проекта 20870 составляют [21,195]:

– дренажные ёмкости К – 4 шт по 8 м^3 = 32 м^3;

– цистерны осушения Д – 4 шт по 8 м^3 = 32 м^3;

– цистерна вод дезактивации блока перегрузки – 40 м^3;

– баки выдержки – 3 шт по 5,49 м^3 + 1,4 м^3 (вне баков) = 17,9 м^3.

Масса теплоносителя I контура – 20827 кг.

Содержание радионуклидов в теплоносителе I контура на момент 3 этапа работы ПАТЭС приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Содержание радионуклидов в теплоносителе I контура [195]

Радионуклид	Активность, Бк/кг
Хром - 51	$1{,}0\cdot10^4$
Марганец - 54	$2{,}3\cdot10^2$
Марганец - 56	$1{,}7\cdot10^4$
Железо - 59	$2{,}3\cdot10^2$
Кобальт - 58	$1{,}7\cdot10^3$
Кобальт - 60	$4{,}8\cdot10^3$
Цирконий - 95	$1{,}9\cdot10^3$
Йод - 131	$4{,}4\cdot10^6$
Йод - 132	$2{,}0\cdot10^8$
Йод - 133	$7{,}0\cdot10^7$
Йод - 134	$4{,}4\cdot10^8$
Йод - 135	$1{,}4\cdot10^8$
Цезий - 134	$5{,}6\cdot10^5$
Цезий - 137	$6{,}0\cdot10^5$

В таблице 2.2 приведена максимальная объёмная активность ЖРО и определяющих её дозообразующих радионуклидов.

Таблица 2.2 – Максимальная объёмная активность ЖРО и определяющих её дозообразующих радионуклидов [195]

Активность, 10^4 Бк/кг						
Продукты коррозии		Продукты деления				Сумма
^{54}Mn	^{60}Co	$^{90}Sr+^{90}Y$	^{134}Cs	$^{137}Cs+^{137m}Ba$	$^{144}Ce+^{144}Pr$	
2	2	5	8	15	8	40

Консервативно принимается, что состав ЖРО в цистернах соответствует составу радионуклидов I контура. По объемной активности ЖРО на ПАТЭС относится к первой и второй категории – низкоактивные и среднеактивные.

Конструкция емкостей для ЖРО

Согласно нормативным требованиям безопасности емкость для ЖРО состоит из наружной защитной оболочки и размещенной в ней цистерны. Оболочка представляет собой вертикальный или горизонтальный герметичный цилиндрический сосуд с днищами. Материал – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

Зазор между стенками цистерны и оболочки заполнен специальным сорбентом для поглощения протечек ЖРО в случае повреждения цистерны или для герметизации образовавшейся пробоины.

Цистерна оснащена монтажными узлами для крепления в оболочке. В цистерне размещены датчики уровня ЖРО, а также системы закачивания/слива и перемешивания ЖРО, вентиляции, сигнализации, отключения подачи ЖРО при несрабатывании датчика уровня отходов, а также обогрева (для подогрева ЖРО и систем упаковки при эксплуатации ее в автономном режиме в холодное время года). В нижней части цистерны расположен зумпф для сбора остатков ЖРО из трубопроводов после слива.

Для сохранения целостности и герметичности при нормальных условиях эксплуатации и возникновении проектных аварий емкость ЖРО и

все системы упаковки единым блоком размещены в специальном транспортном контейнере, который представляет собой силовой каркас (рис.2.1). Для обеспечения извлечения емкости ЖРО в случае необходимости верхняя часть контейнера – съемная.

Рис. 2. 1 – Основные узлы контейнера СХПЖРО [228]

Электропитание специального оборудования упаковки осуществляется от малогабаритной автономной электростанции мощностью 12 кВт. Как известно, «основными параметрами, характеризующими нормальную работу средств хранения и перевозки ЖРО, являются: уровень ЖРО в баках; уровень запирающей жидкости в гидрозатворах; температура в емкостях; давление (разрежение) в монжюсе; перепад давления на аэрозольных фильтрах очистки сдувок; плотность кубового остатка. При отклонении параметров от номинальных значений срабатывают сигнализация на щите СВО или защитные блокировки. Арматура СХПЖРО имеет автоматическое или дистанционное управление» [228].

Характеристики ЖРО

«ЖРО представляет собой преимущественно минеральные растворы с общим солесодержанием не более 500 г/л, в том числе взвеси (нерастворимые соли и механические загрязнения) с общим

солесодержанием не более 100 г/л. Плотность – не более 1,25 т/м3, pH – 6^{-10}, кинематическая вязкость – не более 2,5 сантистокс.

Объемная активность отходов не должна превышать $3,7*10^{6}$ кБк/м3 (10^{-4} Ки/л) по α- и β- излучающим радионуклидам с энергией излучения не больше, чем у ^{137}Cs, и $3,7*10^{3}$ кБк/м3 (10^{-7} Ки/л) по остальным α- и β-излучающим нуклидам» [228].

Проектная мощность дозы от перевозимых ЖРО, в соответствии с СанПиН 2.6.1.1281-03, не превышает 2 мЗв/ч в любой точке на поверхности упаковки и 0,1 мЗв/ч в любой точке на расстоянии 1 м от упаковочного комплекта.

Проект ПАТЭС предусматривает перевозку РМ до места переработки и захоронения как минимум двумя видами транспорта: морским и железнодорожным, что предполагает перегрузку РМ с морского судна в железнодорожный вагон.

Габаритно-массовые характеристики емкостей с РМ позволяют перевозить его железнодорожным транспортом в габаритах подвижного состава 02-ВМ ГОСТ 9238-83 с учетом существующей транспортно-технологической цепочки обращения с ТУК. Например, возможна перевозка в вагоне-контейнере ТК-13 с незначительной доработкой элементов конструкции вагона [226].

Принципиально возможна перевозка в вагоне-контейнере, однако требуется существенная доработка элементов конструкции вагона. Вопросы защищенности СХПЖРО при перегрузке РМ с одного вида транспорта на другой также необходимо исследовать.

Таким образом, обеспечение безопасности при перевозке РМ требует выявление причин ТА как на отдельных этапах перевозки, так и на всем ЖЦ МП.

2.2 Анализ причин ТА на СХПЖРО

Анализ проведенный на основе данных, приведенных в [226, 228] показал, что существующие СХПЖРО имеют ряд конструктивных особенностей, недостатков и уязвимых мест в защите, которые могут при действии ПФ источников ЧС привести к нарушению герметичности и как следствие к радиационной аварии (РА). На основе изучение опыта эксплуатации, характеристик цистерн в атомной отрасли [228] и железнодорожном транспорте [226] и проведенного анализа конструктивных особенностей и недостатков СХПЖРО показано, что основные уязвимые места и непосредственные причины техногенной аварии, как источника ЧС это:

зоны приварки лап к котлу (трещины);

ударная розетка (трещины и изломы);

хребтовая балка (трещины у задних упорных угольников);

котел цистерны (потеря устойчивости);

сливо-наливная и контрольная арматура (нарушение герметичности);

предохранительные клапаны (различные отказы);

котел (трещины из-за повышенных напряжений при различных режимах);

коррозионные повреждения несущих элементов котла и рамы (снижение толщин, нарушение прочности);

повышение давления в котле из-за нагрева продукта (возможен взрыв);

нахождение оболочки котла в очаге пламени (локальное повышение температуры, выпучивание, возможная разгерметизация и взрыв) и др.

2.3 Выводы по главе 2

Проведенный анализ по выявлению причин и «слабых мест» в конструкции СХПЖРО и возможных ТА на этапах МП позволили

определить направления дальнейших исследований, включающих математическое моделирование процессов воздействия ПФ источников ЧС на СПХЖРО и разработку средств защиты. Учитывая, что объект исследования будет находится в условиях действия различных физических ПФ источников ЧС на всех этапах ЖЦ МП, то к СХПЖРО должны предъявляться повышенные требования по их защищённости. Эти требования можно сформулировать только на основании изучения опыта эксплуатации, характеристик цистерн и прогнозирования аварийных ситуаций. Все это позволило разработать и описать в третьей главе сценарии основных возможных аварийных ситуаций которые могут происходить с цистернами для РМ на ПАТЭС и которые могут привести к нарушению их герметичности и как следствие к РА.

Глава 3 РАЗРАБОТКА ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ПРИ КОТОРЫХ ВОЗМОЖНО НАРУШЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ С ЖРО И ВОЗНИКНОВЕНИЕ РА

3.1 Формализованное представление структуры развития техногенной аварии с помощью метода дерева событий.

Третья глава посвящена разработке возможных вариантов развития проектных и запроектных аварийных ситуаций, при которых возможно нарушение герметичности котла цистерны с ЖРО и возникновение РА. При работе любого сложного технического объекта могут происходить разного рода отказы и инциденты. В нормативных документах предусмотрены такие ситуации и предусматриваются действия, называемые в дальнейшем мероприятиями, по их предупреждению и ликвидации. В системе СХПЖРО могут создаваться проектные аварийные ситуации, возникновение которых обусловлено «переполнением баков, повышением давления в них, их разуплотнением. При переполнении баков избыток жидкости через гидрозатвор переливается в герметичное помещение, а затем перекачивается в резервный бак. При превышении допустимого давления срабатывает гидрозатвор и ГВС выбрасывается в помещение, а далее через систему вентиляции — в вентиляционную трубу. При разуплотнении бака радиоактивная среда вытекает в герметичное помещение. Сброс отходов переводится на резервную емкость, находящиеся в разуплотненном баке отходы также перекачиваются в резервную емкость» [228]. ТА, вызванные внутренними и внешними воздействиями, исходя из вероятности их возникновения. являются проектными. Аварии, вероятность исходных событий которых менее 10^{-6} событий в год, относятся к запроектным. Хотя вероятность таких ТА очень мала, последствия таких событий очень тяжелые. Поэтому в работе в рамках консервативного подхода разработаны

десять сценариев запроектных аварийных ситуаций с ЖРО на ПАТЭС при перевозке РМ, из которых два сценария ведут к РА и выходу РМ в окружающую среду. Предложено формализованное представление структуры развития техногенной аварии с помощью метода дерева событий (рис. 3.1, 3.2), позволяющее сформировать комплекс сценариев. При разработке сценариев аварий в рамках консервативного подхода рассмотрены аварии третьей категории, при которых упаковки, содержащие РМ, частично или полностью разрушены и наблюдается высокий уровень излучения и выход радиоактивного содержимого из упаковок. Разработана модель аварий, при которой воздействие ПФ источника ЧС на преграду в виде переборок, борта судна, шпангоуты и стенки емкости с РМ. В основе сценариев развития аварий лежат исследования возможных опасных воздействий на объект — СХПЖРО (цистерну, упаковку, контейнер и т.п.) в виде пожара и взрыва, а также на окружающую среду (выход и распространение опасных веществ). В качестве опасных веществ рассматривались РМ.

Рассмотрены радиационные последствия запроектных аварий. Радиационные последствия в виде поступления РМ в окружающую среду возможны при следующих сценариях:

частичного разрушения СХПЖРО при:

пожаре в ЦПУ ПЭБ и последующем взрыве кислородных баллонов на борту судна во время буксировки и стоянки;

пожаре и дефралгационном взрыве СУГ в железнодорожной цистерне при перегрузке ТУК с морского на железнодорожный транспорт;

таран ПЭБ в район хранилищ ОТВС и ЖРО, ТРО другим судном, скорость которого существенно больше критической при буксировке;

длительная посадка ПЭБ на скалистую отмель в штормовых условиях при буксировке по СМП.

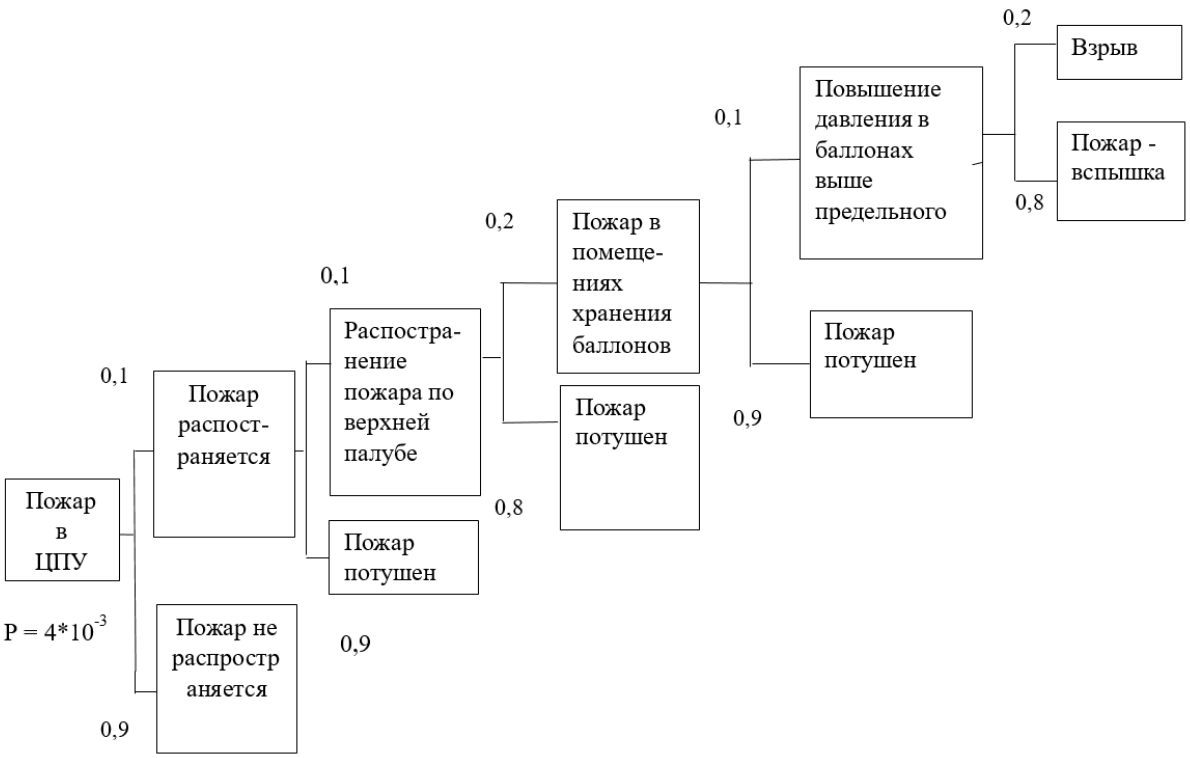

Рис. 3.1 – Фрагмент построенного дерева событий сценариев ТА при пожаре в ЦПУ

Подробный перечень исходных событий для разработки возможных сценариев ТА приведен в приложении Б.

В качестве инициирующих событий (ИС) рассмотрены взрывы газовых баллонов на борту ПЭБ. Газовые баллоны являются источниками потенциальной опасности возникновения взрыва, который приводит к разрушению корпусных конструкций, выходу из строя оборудования ПЭБ, и возникновению РА. Взрыв баллонов может быть вызван двумя причинами:

Нарушение целостности газового баллона вследствие поломки какого-либо узла (арматуры), повреждения или коррозии корпуса, неправильной эксплуатации может привести к взрыву баллона при рабочем давлении. Вероятность взрыва баллона (сосуда) высокого давления в этом случае составляет 10^{-7} 1/ год [195];

Превышение предельного значения давления в случае пожара. Для баллонов с нереагирующими газами (воздух, азот, аргон) при

несрабатывании предохранительного клапана давление газа при нагреве повышается, до тех пор, пока не произойдет взрыв. В баллонах с реагирующими газами (кислород и ацетилен) может возникнуть детонация, приводящая к скачкообразному росту давления и взрыву.

Вероятность взрыва баллонов при пожаре в помещении в соответствии с формулой, представленной в [42]:

$$P_{взрыв} = P_{пож.} \cdot \left(1 - \left(1 - P_{неоткр}\right)^{n_{бол}}\right) \quad (3.1)$$

где, $P_{пож}$ – вероятность возникновения пожара в помещении; $P_{неоткр}$ – вероятность неоткрытия предохранительного клапана ; $n_{бал}$ – количество баллонов в помещении.

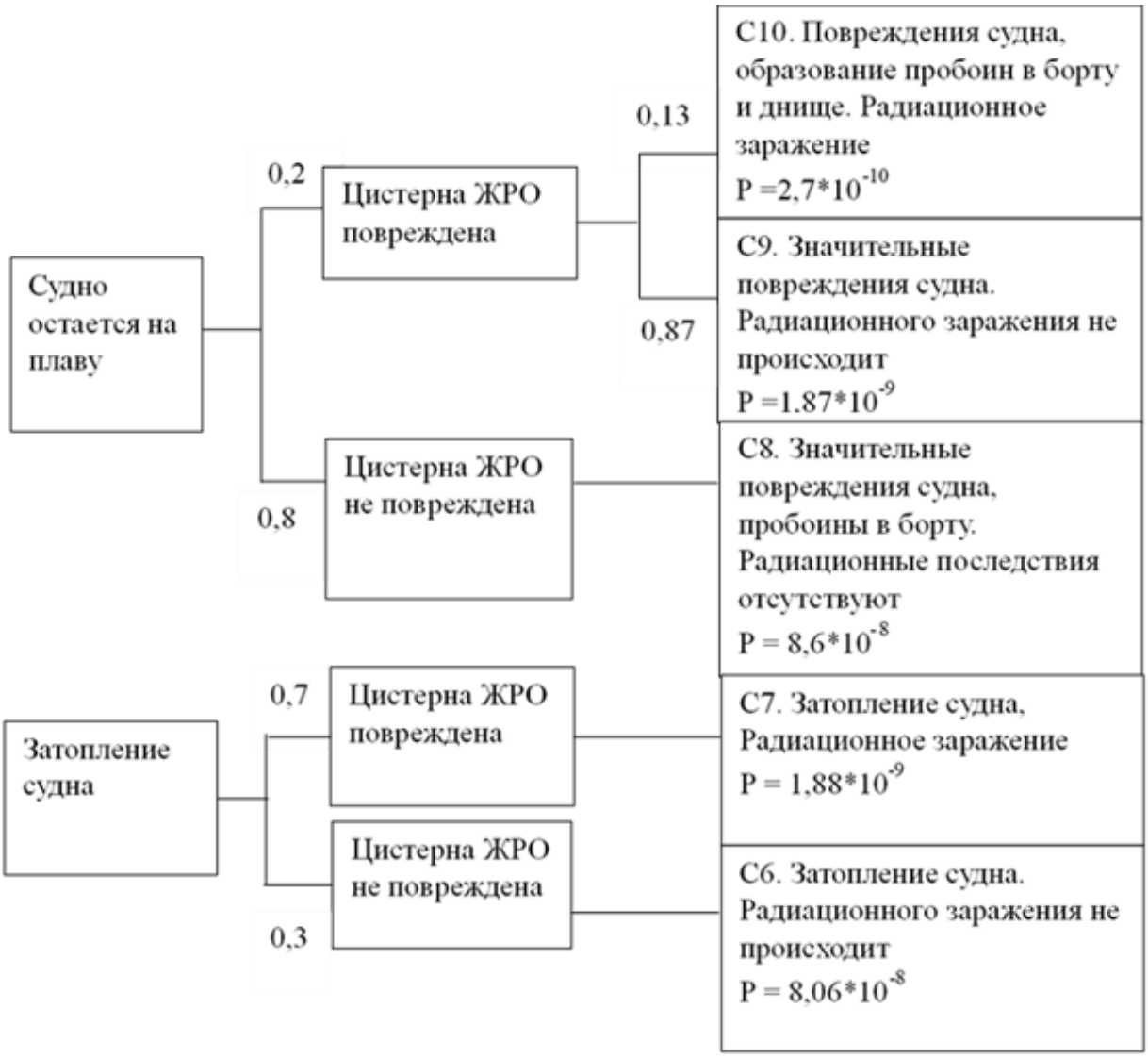

Рис. 3.2 – Фрагмент построенного дерева событий сценариев РА

Предохранительные клапаны, установленные на газовых баллонах, в соответствии с ОСТ5.5032-83 имеют вероятность безотказной работы P=0.98 в течении непрерывной работы T=5000 ч.

3.2 Детерминированный расчет последствий техногенного пожара на конструкции ПАТЭС.

Известно, что «наиболее значимыми пожарными зонами ПАТЭС являются:

помещения машинного отделения, характеризующиеся зависимыми отказами вследствие пожара части активного оборудования систем теплоотвода (примерно 25%);

помещения, характеризующиеся зависимыми отказами вследствие пожара щитов электроснабжения (примерно 22%);

помещения автоматики (примерно 13%)» [195].

В работе представлен детерминированный расчет последствий техногенного пожара в помещениях ПАТЭС.

Анализ распространения пожара в помещениях ПАТЭС выполнялся с использованием программного комплекса Fire 3.0. Программный комплекс Fire 3.0 имеет рег. № 2011614083 ФГУ ФИПС (Федеральный институт промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентным и товарным знакам).

Из графика повышения среднеобъёмной температуры видно (рис. 3.3), что через двадцать минут, когда в рамках консервативного подхода предполагается что первичные средства защиты не сработали или не были применены, среднеобъемная температура ГВС составляет 550 градусов Цельсия, а через тридцать минут – 1200 градусов. Температура ограждающих конструкций растет немного медленнее и достигает критических значений в 250 градусов Цельсия для переброски огня в другие помещения через 30 минут по палубе и через 45 минут по кормовым и носовым переборкам.

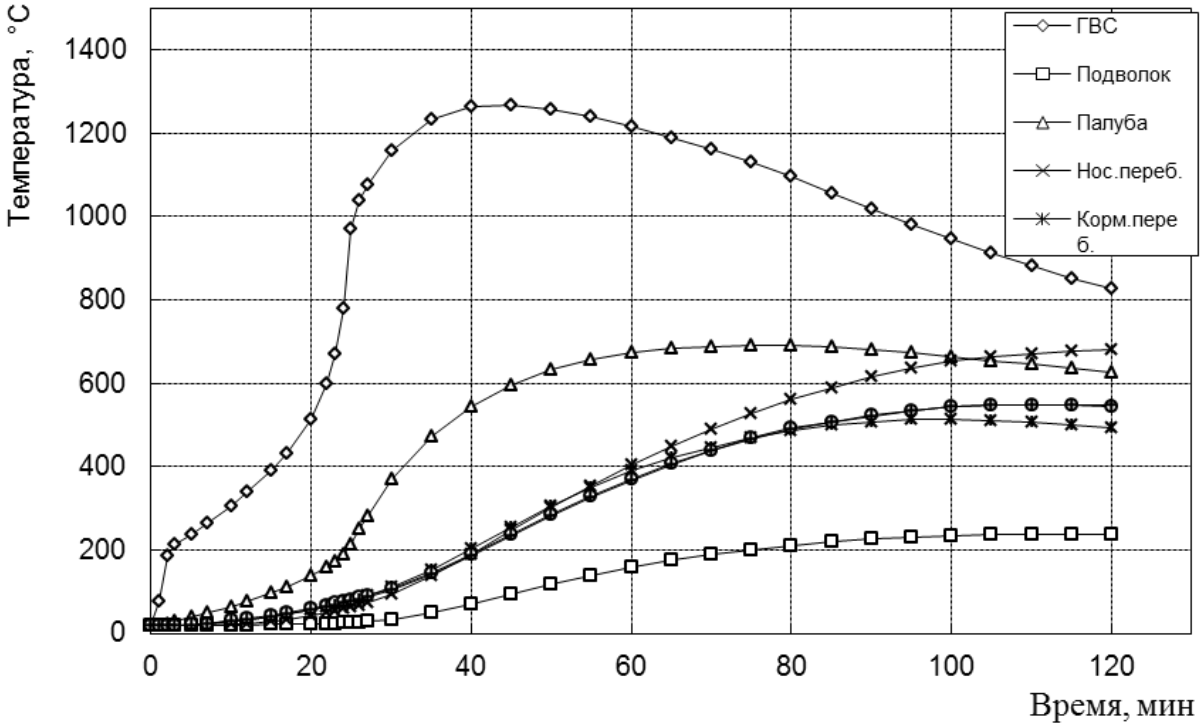

Рис. 3.3 – Изменение среднеобъемной температуры в помещении ЦПУ

Детерминированный расчет изменения среднеобъемной температуры в помещениях ПАТЭС на примере ЦПУ показал, что металлические конструкции палубы нагреваются через сорок минут с начала пожара в ЦПУ до 500 градусов Цельсия, что достаточно для нагрева баллонов с кислородом до критической температуры. при которой возможен детонационный взрыв вследствие повышения внутреннего давления баллона выше пороговых значений.

3.3 Детерминированный расчет последствий техногенного взрыва на конструкции ПАТЭС

В соответствии с РБ Г-05-039-96 «Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия» для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) «анализ опасности воздействий аварийных взрывов на объектах для зданий и сооружений ОИАЭ выполняется в следующей последовательности.

Этап 1 – на основании данных обследований на исследуемой

территории и на площадке ОИАЭ определяются возможные источники аварийных взрывов и расстояния от каждого источника до зданий и сооружений ОИАЭ, важных для безопасности.

Этап 2 – определяются параметры и характеристики основных поражающих факторов от всех источников аварийных взрывов.

Этап 3 – определяются критерии взрывоустойчивости зданий и сооружений, важных для безопасности ОИАЭ.

Дальнейшая последовательность анализа зависит от того, производится ли оценка взрывоустойчивости зданий и сооружений действующего (реконструируемого) объекта или вновь проектируемого объекта.

Этап 3.1 – при оценке взрывоустойчивости действующих (реконструируемых) объектов в качестве критерия используется реальная взрывоустойчивость зданий (сооружений); при этом допускается принимать во внимание сведения об их устойчивости к другим типам нагрузок и воздействий (длительных, кратковременных, особых).

Этап 3.2 – при оценке взрывоустойчивости вновь проектируемых зданий и сооружений анализируются критерии, заложенные в проектные основы для проектирования зданий, сооружений, систем и элементов, важных для безопасности. Одним из таких критериев применительно к воздействию ВУВ является величина допускаемого давления на здания и сооружения, важные для безопасности, определяемая в соответствии с требованиями действующих нормативных документов и/или на основании результатов обследования площадки ОИАЭ и исследуемой территории вокруг ОИАЭ.

Для борта ПЭБ пороговая величина применительно к воздействию ВУВ является величина допускаемого избыточного давления – 50 кПа обоснованного в [42, 43].

Этап 4 – проводится оценка опасности аварийных взрывов.

Этап 4.1 – для действующих объектов проводится консервативная

оценка по выбранным критериям взрывоустойчивости зданий и сооружений на воздействия, которые могут оказывать выявленные источники взрывной опасности, на основе экспресс-оценок. Для реконструируемых и проектируемых ОИАЭ применение экспресс-оценок допустимо только для предварительных оценок.

Этап 4.2 – если полученные консервативные результаты на этапе 4.1 для действующих объектов не удовлетворяют поставленным целям оценок взрывоустойчивости, производится уточненный анализ взрывоустойчивости на основе реалистических оценок (уточненных моделей взрыва и моделей сооружений).

Этап 4.3 – анализ взрывоустойчивости на основе реалистических оценок для проектируемых и реконструируемых ОИАЭ.

Результаты этапов 4.2 и 4.3 более предпочтительны для принятия решения для действующих, реконструируемых и проектируемых ОИАЭ.

Этап 5 – допускается применение вероятностных подходов при определении опасности аварийных взрывов в целях снижения консерватизма оценок, если имеются данные количественных оценок вероятности аварийных взрывов, полученных методами статистической обработки данных по аварийным взрывам на объектах-источниках, аналогичных анализируемому.

Этап 6 – если уточненный анализ взрывоустойчивости показывает, что взрывоустойчивость зданий и сооружений ОИАЭ не обеспечивается, следует проводить инженерно-технические и организационные мероприятия. В их числе: перенос источников аварийных взрывов, реконструкция зданий или сооружений ОИАЭ, разрушение которых приводит к последствиям, оказывающим влияние на системы и элементы ОИАЭ, важные для безопасности, и на безопасность ОИАЭ в целом. Могут также ставиться вопросы о запрещении эксплуатации этих источников, приводиться рекомендации по уточнению регламентов их эксплуатации и принятию

защитных мер на предприятиях - владельцах ВВ» [44].

Проведем оценку опасности аварийных взрывов на ПАТЭС. Известно, что ПФ при взрывном разрушении сосудов высокого давления являются осколки, газодинамическая струя и избыточное давление в аварийном помещении в результате истечения газа из сосуда. В работе представлен детерминированный расчет последствий техногенного взрыва баллонов с кислородом на конструкции ПАТЭС для ВУВ и осколочного действия.

3.3.1 Оценка действия ВУВ на конструкции ПАТЭС

Взрыв газовых баллонов

В состав энергетической установки и общесудовых систем ПЭБ входят баллоны с сжатым воздухом, азотом, кислородом, ацетиленом, аргоном [195]. В помещениях энергетической установки ПЭБ размещены следующие газовые баллоны: баллоны с азотом — в помещениях аппаратной №1,2, баллоны с сжатым воздухом — в МО №1, №2, помещениях №1, №2 вспомогательных механизмов РДГ, помещении вспомогательных механизмов КО, помещении общесудовых систем, в помещении компрессоров и помещениях АДГ№1, №2, №3, №4. Баллоны с кислородом, ацетиленом и аргоном размещены в специальных помещениях на верхней палубе 6 отсека [195].

Характеристики газовых баллонов и данные по их размещению представлены в таблице 3.1. Баллоны для воздуха соответствуют ГОСТ 9731-79 «Баллоны стальные бесшовные большого объема для газов на P_p <24,5 МПа (250 кгс/см^2)», баллоны для аргона, кислорода и ацетилена соответствуют ГОСТ 949-73 «Баллоны стальные малого объема для газов на P_p <20 МПа (200 кгс/см^2)». Материал баллонов — сталь 30ХМА. ГОСТ 8731-66.

Таблица 3.1 - Характеристики газовых баллонов со сжатым воздухом

№ п/п	Помещение	Система	Индекс, газ	Рабо-чее давле-ние, МПа	Кол-во в помещении, шт.	Координаты баллонов		
						палуба	шпангоут	расстояние от ДП
1	Пом.А ДГ№1	Баллон пускового воздуха	1-130-9,8 воздух	3	1	2 ярус	115	ПБ 8950
2	Пом.А ДГ№2			3	1	3 ярус	116	ЛБ 5085
3	Пом.А ДГ№3			3	1	3 ярус	116	ПБ 5085
4	Пом.А ДГ№4			3	1	2 ярус	115	ЛБ 8950
5	Пом №1 вспом механизмов РДГ	Система сжатого воздуха системы высокого давления для РО	1-100-24,5 Воздух	20	2	2 дно	127	ПБ 13136
			2-160-24,5 воздух	20	4	2 дно	120	ПБ 5900
6	Пом №2 вспом механизмов РДГ	Система сжатого воздуха системы высокого давления для РО	1-100-24,5 воздух	20	2	2 дно	125	ЛБ 5840
			2-160-24,5 воздух	20	4	2 дно	120	ЛБ 13108
7	Пом вспом механизмов КО	Система сжатого воздуха системы высокого давления	2-160-24,5 воздух	20	2	2 дно	125	ПБ 4920
8	Пом общесудовых систем	Система сжатого воздуха системы высокого давления	2-100-24,5Л воздух	20	1	2 дно	21	8935 ПБ
		Система сжатого воздуха системы высокого давления	2-250-24,5Л воздух	20	2	2 дно	22	8135 ПБ

Продолжение таблицы 3.1

9	МО №1	Система сжатого воздуха системы высокого давления	1-160-24,5 воздух	20	2	2 дно	41	0 (ДП)
		Система сжатого воздуха системы высокого давления для РО	1-160-24,5 воздух	20	4	2 дно	65	ПБ 3153-4593
10	МО №2	Система сжатого воздуха системы высокого давления	1-160-24,5 воздух	20	2	2 дно	41	0 (ДП)
		Система сжатого воздуха системы высокого давления для РО	1-160-24,5 воздух	20	4	2 дно	65	ЛБ 1700-3140
11	Пом. компрессоров	Система сжатого воздуха системы высокого давления для РО	1-100-24,5 воздух	20	2	3 палуба	128	ЛБ 5500-ПБ 5500
			1-250-24,5 воздух	20	10	3 палуба	128	ЛБ 5500

Методика оценки размеров области разрушений, вызванных взрывами газовых баллонов, базируется на положениях, изложенных в [42,43,44].

Поражающими факторами при взрывном разрушении сосудов высокого давления являются осколки, газодинамическая струя и избыточное давление в аварийном помещении в результате истечения газа из сосуда. Силовое воздействие газовой струи, истекающей из сосуда, с увеличением расстояния быстро снижается. Избыточное давление в аварийном помещении из-за относительно больших размеров судовых помещений и наличия «разгрузочных» отверстий (двери, люки, а также неплотности поврежденных корпусных конструкций) тоже быстро снижается, но является опасным. Но самые основные разрушения корпусных конструкций и оборудования определяются воздействием осколков. Оценим степень опасности техногенного взрыва на корпусные конструкции судна.

В таблице 3.2 приведены основные характеристики кислородных баллонов и баллонов с аргоном.

Таблица 3.2 - Характеристики кислородных баллонов и баллонов с аргоном

№ п/п	Помещение	Система	Индекс, газ	Рабочее давление, МПа	Кол-во в помещении, шт.	Координаты баллонов	№ п/п	Помещение
1.	Пом. баллонов с кислородом		кислород		20	ВП	102	ЛБ
2.	Пом. баллонов с аргоном		аргон		20	ВП	108	ЛБ
3.	Пом. аппаратной №1	Система компенсации давления	2-500-25Л азот	20	18			
4.	Пом. аппаратной №2	Система компенсации давления	2-500-25Л азот	20	18			

В ходе оценки опасности ТА определены избыточное давление во фронте ударной волны, скорость разлета осколков разрушающегося баллона, толщина эквивалентной непробиваемой стальной преграды и размер области разрушений в виде зон поражения и их радиусов.

Определим давление газа в баллоне при взрыве

При разогреве взрыв баллона с нереагирующими газами происходит вследствие роста давления внутри баллона и снижения прочностных свойств материала стенки баллона. Условие взрыва газового баллона при разогреве:

$$P_{бал}\ (T_{газ}) = P_{пред}\ (T_{ст}) \qquad (3.2)$$

$P_{бал}\ (T_{газ})$- давление газа в баллоне, МПа;

$T_{газ}$ – температура газа в баллоне, К;

$P_{пред}$ $(T_{ст})$ - предельное давление газа, определяемое из условий прочности баллона, МПа;

$T_{ст}$- температура стенки баллона, К.

Давление газа в баллоне при изохорном разогреве определяется в соответствии с зависимостью для идеального газа:

$$P_{бал}(T_{газ}) = P_p \cdot T_{газ} / T_p \qquad (3.3)$$

P_p- начальное (рабочее) давление в баллоне, МПа;

T_p- температура газа в баллоне при рабочих условиях, К.

Предельное давление газа в баллоне определяется на основании:

$$P_{пред}(T_{ст}) = P_h \cdot n_в \cdot \sigma_{мат}(T_{ст}) / \sigma_0 \qquad (3.4)$$

$n_в$ - коэффициент запаса прочности, в соответствии с рекомендациями [63,84] определен как $n_в$=2,4;

$\sigma_{мат}(T_{ст})$ - временное сопротивление материала баллона при заданной температуре $T_{ст}$, МПа;

σ_0 - временное сопротивление материала при начальной (рабочей) температуре баллона T_p, МПа.

Предполагая равенство температур $T_{ст}$ = $T_{газ}$, на основании (3.2-3.4) получаем уравнение для определения температуры $T_в$, при которой происходит взрыв баллона

$$P_{бал}(T_в) = P_{пред}(T_в) \qquad (3.5)$$

Уравнение (3.5) может быть решено, например, графическим способом (рис. 3.4).

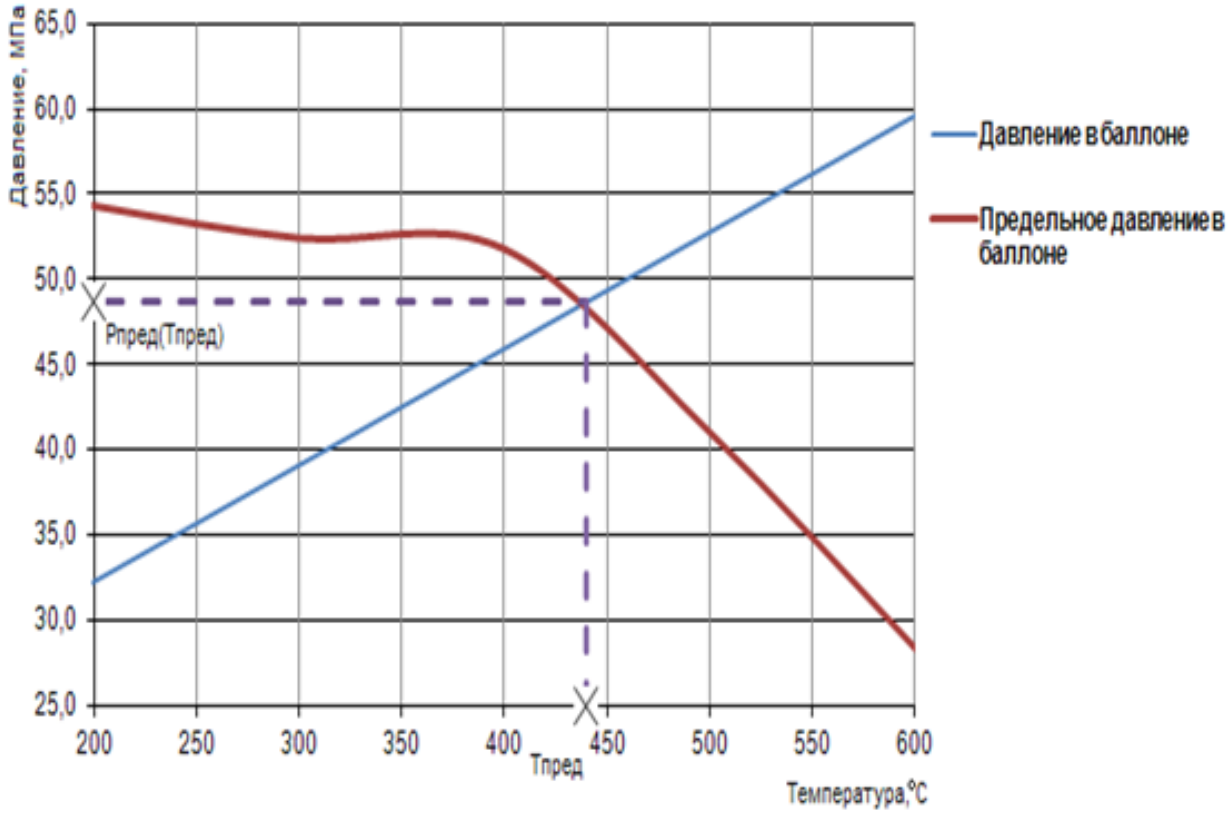

Рис. 3.4 – Зависимость давления в баллоне от температуры

Внутреннее давление при разрушении баллона:

$$P_в = P_{бал}(T_в) \tag{3.6}$$

При разогреве баллона $T_{ст} > T_{газ}$, и, поскольку временное сопротивление материала уменьшается с ростом температуры, действительное значение $P_{пред}(T_{ст}) < P_{пред}(T_в)$. Таким образом, полученное из уравнения (3.6) значение $P_в$ является завышенным и может быть использовано для консервативной оценки последствий взрыва (чем больше давление газа при взрыве баллона, тем больше разрушающая способность осколков).

Реагирующие газы (кислород, ацетилен)

В случае реагирующих газов рассматривается наиболее опасная ситуация — детонация газа и разрушение баллона. В соответствии с рекомендациями [44] давление взрыва принимается равным:

$$Pв = 2(q+1)\ P_p \qquad (3.7)$$

где q=8.

Физический взрыв баллона с кислородом

Необходимо рассчитать энергию взрыва баллона, тротиловый эквивалент, избыточное давление во фронте ударной волны на расстоянии 5 м от эпицентра взрыва и скоростной напор воздуха

Решение

1. Определим энергию взрыва баллона, кДж,

$$A = \frac{P - P_0}{\gamma - 1} \times V, \qquad (3.8)$$

где P – давление в сосуде перед разрушением (определяется при испытаниях), принимаем согласно табл. 10 ;

P_0 - атмосферное давление, P_0=101 кПа;

V – объем баллона, $м^3$;

γ - показатель адиабаты.

$$A = \frac{22{,}5 \times 10^3 - 101}{1{,}4 - 1} \times 0{,}04 = 2239{,}9 кДж.$$

2. Определим тротиловый эквивалент, кг,

$$ТЭ = \frac{A}{4{,}6 \times 10^3}, \qquad (3.9)$$

$$ТЭ = \frac{2239{,}9}{4{,}6 \times 10^3} = 0{,}487 кг.$$

3. Найдем избыточное давление во фронте ударной волны, кПа,

$$\Delta P_ф = \frac{105}{R} \times q_{у.в.}^{1/3} + \frac{410}{R^2} \times q_{у.в.}^{2/3} + \frac{1370}{R^3} \times q_{у.в.}, \qquad (3.10)$$

где R – расстояние от эпицентра взрыва, R=5 м.

Для свободно распространяющейся в атмосфере ударной волны воздушного взрыва:

$$q_{у.в.} = 0{,}5 \times ТЭ = 0{,}5 \times 0{,}487 = 0{,}244 кг.$$

$$\Delta P_ф = \frac{105}{5} \times 0{,}244^{1/3} + \frac{410}{5^2} \times 0{,}244^{2/3} + \frac{1370}{5^3} \times 0{,}244 = 22{,}19 кПа.$$

4. Найдем скоростной напор воздуха, кПа,

$$\Delta P_{ск} = \frac{2{,}5 \Delta P_ф^2}{\Delta P_ф + 7 P_0}, \quad (3.11)$$

$$\Delta P_{ск} = \frac{2{,}5 \times 22{,}19^2}{22{,}19 + 7 \times 101{,}3} = 1{,}68 кПа.$$

При взрыве одного баллона с кислородом объект воздействия окажется в зоне воздействия ударной волны с избыточным давлением 22,19 кПа. В соответствии с таблицами тяжести разрушения (табл.3.3) сделаем оценку степени разрушения объекта воздействия, представленными в приказе Ростехнадзора от 11.03.2013 N 96 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных…производств" [234].

Таблица 3.3 - Тяжесть разрушений при взрыве

Классификация зон разрушения Класс зоны разрушения	K	Δ P, кПа	Вероятные последствия, характер повреждений зданий и сооружений
1	3,8	>= 100	Полное разрушение зданий с массивными стенами
2	5,6	70	Разрушение стен кирпичных зданий толщиной в 1,5 кирпича; перемещение цилиндрических резервуаров; разрушение трубопроводных эстакад
3	9,6	28	Разрушение перекрытий промышленных зданий; разрушение промышленных стальных несущих конструкций; деформации трубопроводных эстакад
4	28	14	Разрушение перегородок и кровли зданий; повреждение стальных конструкций каркасов, ферм
5	56	<= 2	Граница зоны повреждений зданий; частичное повреждение остекления

Для рассмотренного случая объект воздействия находится в области разрушения четвертого класса для последствий взрыва одного баллона.

На рис. 3.5 представлен график избыточного давления во фронте воздушной ударной волны от расстояния от центра взрыва (помещение для хранения баллонов) до объекта воздействия (левый борт ПЭБ) при взрыве двадцати баллонов с кислородом. При взрыве двадцати баллонов в помещении для хранения баллонов при детонации избыточное давление во фронте ударной волны в 5 м от центра взрыва составит 136 Кпа, что соответствует первому классу зоны разрушения объекта. Учитывая, что помещения с кислородными баллонами находятся по ЛБ**,** который согласно [42, 43] выдерживает избыточное давление до 50 КПа, то на ЛБ будет воздействовать давление от 63 Кпа (9м), 38КПа(10м) до 19 КПа (15м).

В таблице 3.4 даны характеристики кислородных, ацетиленовых и пропан-бутановых баллонов.

Таблица 3.4 - Характеристики кислородных, ацетиленовых и пропан-бутановых баллонов

Показатель	Баллон		
	кислородный	ацетиленовый	пропан-бутановый
Предельное рабочее давление, МПа (кгс/см^2)	15(150)	1,9(19)	1,6(16)
Испытательное давление, МПа (кгс/см^2)	22,5(225)	3,0(30)	2,5(25)
Состояние газа в баллоне	Сжатый	Растворенный	Сжиженный
Количество газа в баллоне, л	6000	5520	12000
Жидкостная емкость, л	40	40	50
Резьба присоединительного штуцера, вентиля	¾ трубная правая	присоединяется хомутом	левая 21,8х14 ниток на шаг
Размеры, мм:	1390	1390	960
Высота	219	219	300
Диаметр	8	7	3
Толщина стенки, мм	67	52	22
Масса баллона без газа, кг	1,4	1,23	1,13
Показатель адиабаты			

Разрушения в данной области будут соответствовать 3 классу зоны

поражения (табл.3.3), которая характеризуется разрушением промышленных стальных несущих конструкций.

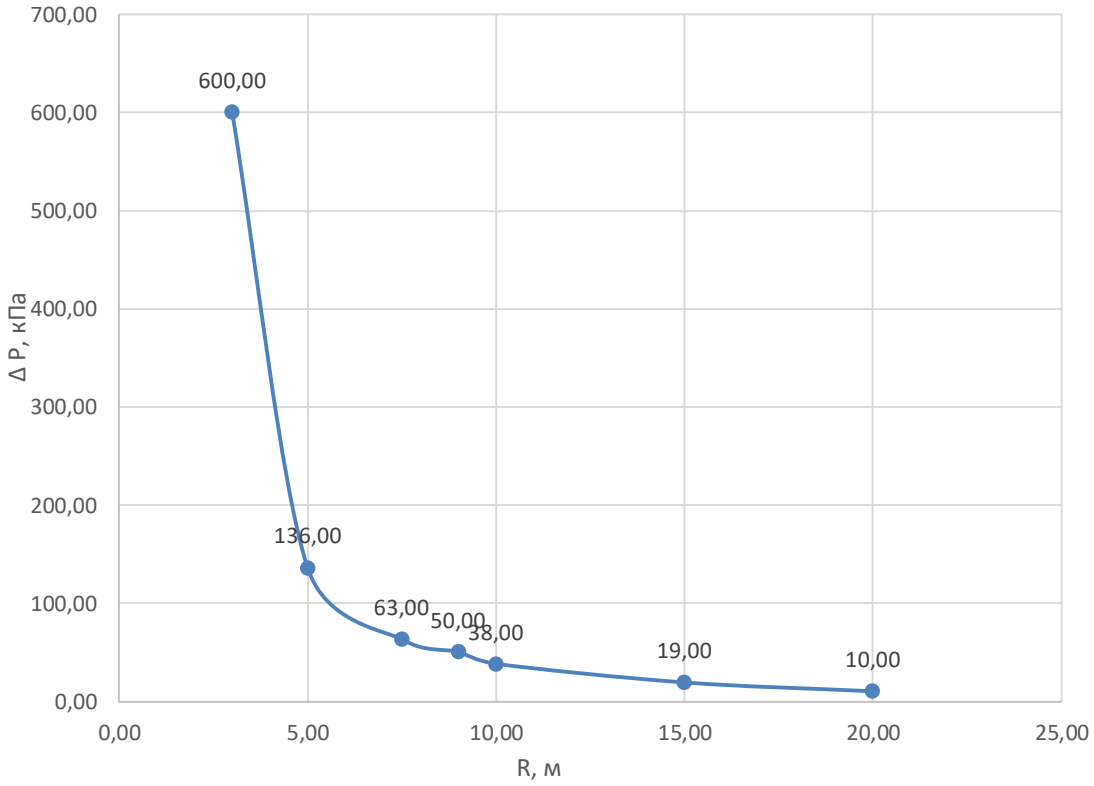

Рис. 3.5 - График избыточного давления во фронте воздушной ударной волны от расстояния от центра взрыва

На графике (рис. 3.5) видно, что до расстояния 9 м от центра взрыва избыточное давление во фронте ударной волны составляет более 50 кПа. Учитывая, что по схеме помещений ПЭБ помещение для хранения кислородных баллонов находится по ЛБ, то в зону поражения попадает стенка ЛБ ПЭБ. Оценка показала, что взрывоустойчивость ПЭБ, оцененной по теоретической детерминированной модели частично не обеспечивается, и следует проводить, согласно [44] инженерно-технические и организационные мероприятия. В их числе нормативные документы предусматривают: перенос источников аварийных взрывов на безопасное расстояние.

Кроме избыточного давления на ПОО может воздействовать

поражающее действия осколков разрушенных баллонов. Оценим это воздействие.

3.3.2 Оценка поражающего действия осколков на конструкции ПАТЭС

Определение скорости осколков при взрыве газового баллона

Скорость разлёта осколков при взрыве баллона зависит от многих факторов: внутреннего давления в баллоне в момент разрушения, объёма баллона, свойств газа, массы корпуса, которая определяется объёмом баллона и рабочим давлением, и количества образующихся осколков. Скорость осколков определяется в соответствии с рекомендациями [210, 211]:

$$U = a \cdot \overline{U} \tag{3.12}$$

U – скорость осколков, м/с;

$\overline{U}$ - безразмерная приведенная скорость;

a - скорость звука в газе в момент разрушения баллона, м/с;

$$a = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p_{\text{в}}}{\rho_{\text{р}}}} \tag{3.13}$$

γ - показатель адиабаты газа;

$\rho_{\text{р}}$ – плотность газа при рабочих условиях, кг/м^3

$$\rho_{\text{р}} = \frac{\text{P}_{\text{р}}}{R \cdot T_{\text{р}}} \tag{3.14}$$

R - газовая постоянная, Дж/(кг·К);

Приведенная скорость осколков $\overline{U}$ находится по графику, представленному на рис.3.6, где приведённое давление:

$$\overline{P} = \frac{(P_в - P_0) \cdot V}{M_c \cdot a^2} \tag{3.15}$$

$P_{\hat{a}}$ - внутреннее давление при разрушении баллона, Па;

P_0- атмосферное давление, Па;

V- объем баллона, м^3;

M_C - масса стенок баллона, кг.

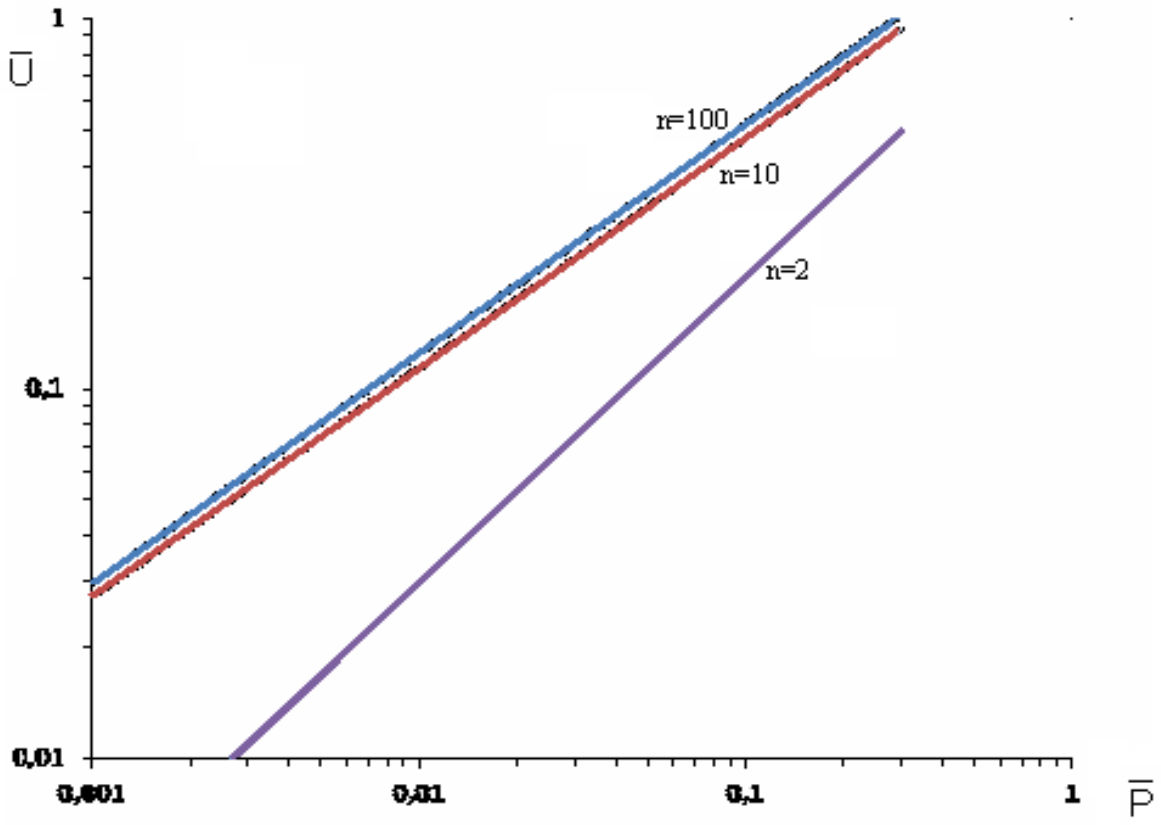

Рис. 3.6 - Зависимость приведённой скорости осколков от безразмерного давления (n - количество осколков) [44]

Оценка размеров области разрушений

Толщину эквивалентной стальной преграды, которая не разрушается при ударе летящим осколком, можно оценить в соответствии с рекомендациями по формуле, приведенной в [133]:

$$\delta_Э = K_c \cdot \sqrt[3]{m} \cdot U \cdot 10^{-2} \qquad (3.16)$$

где $\delta_э$ –толщина эквивалентной стальной преграды, мм;

K_c - коэффициент, зависящий от свойств преграды (K_c= 5).

m – масса осколка, кг ($m=M_c/n$)

n – количество осколков.

При разлете осколки могут тормозиться не только корпусными конструкциями, но и различным насыщением, находящимся в помещении (оборудованием и т.п.). Влияние насыщения помещений характеризуется так называемым коэффициентом насыщения K_δ. Этот коэффициент определяет фиктивную преграду, равномерно распределенную по помещению, и принимается равным толщине фиктивной стальной преграды на единицу длины помещения. При анализе размеров зоны разрушения при взрыве принимается K_δ = 4 мм/м для помещений в которых размещается энергетической оборудование и K_δ = 2,5 мм/м для остальных помещений. Таким образом, разрушение в рассматриваемом направлении от центра взрыва будет распространятся до тех пор, пока суммарная толщина (с учетом корпусных конструкций и фиктивных преград) не будет равна толщине эквивалентной стальной преграды согласно [133]:

$$\delta_э = \sum_i \delta_{ккi} + \sum_i K_{\delta_i} \cdot L_i \qquad (3.17)$$

$\delta_{кк_i}$ — толщина i – ой корпусной конструкции, разрушаемой в рассматриваемом направлении;

K_{δ_i} — коэффициент насыщения i – ого помещения в рассматриваемом направлении;

L_i длина участка или всего i – ого помещения, на которое распространяется разрушение в рассматриваемом направлении.

Размеры осколков, образующихся при разрушении баллона, могут лежать в широком диапазоне. При оценке последствий взрыва баллонов рассматривался наиболее опасный случай, при котором имеют место наибольшие разрушения — разрушение баллона с образованием 10 одинаковых осколков [210, 211].

При взрыве нескольких баллонов размеры области разрушения не увеличиваются по сравнению с аналогичными размерами при взрыве одного баллона, поскольку разрушение нескольких баллонов увеличивает только плотность осколочного потока, сами же параметры осколков (масса, скорость) не изменяются. При наличии в группе баллонов с различными характеристиками в качестве расчётного принимается разрушение баллона, приводящего к максимальным размерам области разрушения.

Согласно консервативного подхода к оценке безопасности, считается, что все оборудование, попадающее в область разрушения (область разлета осколков), выходит из строя. Вне области разрушения оборудование может испытывать распространяющиеся по корпусу местные сотрясения, обусловленные локальным воздействием осколков на корпусные конструкции в зоне разрушения. Эти сотрясения имеют, в основном, высокочастотный характер. Для рассматриваемых процессов по мере удаления от их источников они быстро затухают и вне области разрушений становятся пренебрежимо малыми, поэтому их можно не рассматривать.

Расчет толщины эквивалентной стальной преграды

Толщина эквивалентной стальной преграды, которая не разрушится при ударе летящим осколком рассчитывается по формуле, мм:

$$\delta_Э = K_c \cdot \sqrt[3]{m} \cdot U \cdot 10^{-2}, \qquad (3.18)$$

где K_c — коэффициент, зависящий от свойств преграды;

m — масса осколка, кг.

Толщина эквивалентной стальной преграды, которая не разрушится при ударе летящим осколком, согласно формулы 3.18 составляет:

$$\delta_Э = 5 \cdot \sqrt[3]{6{,}7} \cdot 564{,}5 \cdot 10^{-2} = 53{,}3 \text{ мм}.$$

Толщина стальной обшивки борта составляет 22-30 мм [195].

Толщина эквивалентной стальной преграды с учетом корпусных конструкций и фиктивных преград, мм:

$$\delta_э = \sum \delta_{ккi} + \sum K_{\delta i} \cdot L_i, \qquad (3.19)$$

где $\delta_{ккi}$ — толщина i-ой корпусной конструкции, разрушаемой в рассматриваемом направлении, мм;

$K_{\delta i}$ — коэффициент насыщения i-го помещения в рассматриваемом направлении мм/м;

L_i — длина участка или всего i-го помещения, на которое распространяется разрушение в рассматриваемом направлении.

В соответствии с полученным в ходе исследования графиком зависимости избыточного давления от расстояния до объекта воздействия (см.рис.3.5) рассмотрены два варианта расположения помещения с кислородными баллонами:

I. расстояние до ЛБ исходя из проекта – 7,5 м;

II. предлагаемое безопасное расстояние до ЛБ – 10-15 м.

Оба варианта расположения помещений с кислородными баллонами представлены на рис. 3.7 и рис.3.8.

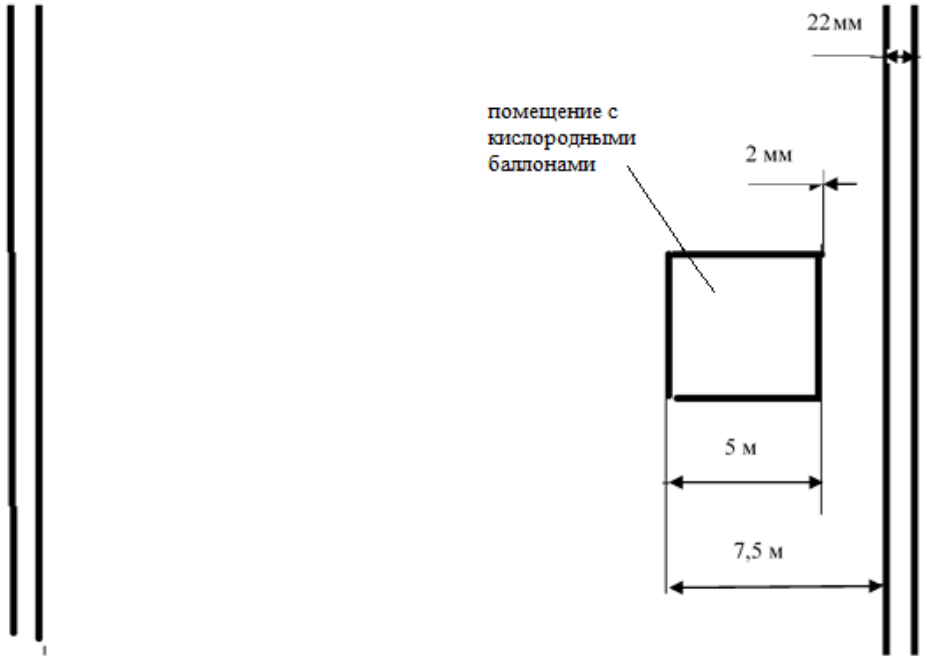

Рис. 3.7 - Первоначальное расположение помещения с кислородными баллонами (вариант I)

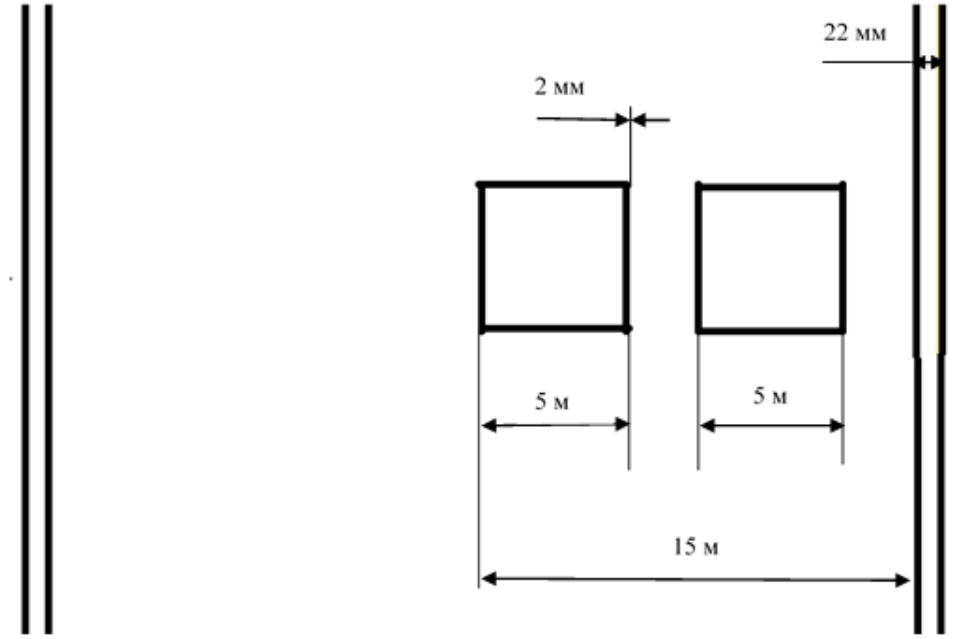

Рис. 3.8 - Предлагаемое расположение помещения с кислородными баллонами (вариант II)

I Вариант. Толщина эквивалентной стальной преграды с учетом корпусных конструкций и фиктивных преград согласно формулы 3.19 составила, мм:

$$\delta_{э1} = (22+2)+(2{,}5\cdot 5+2{,}5\cdot 2{,}5) = 42{,}75.$$

$$\delta_{э1} < \delta_{Э}$$

Происходит разрушение перегородок, в результате образования пробоины в левом борту происходит затопление судна, возможны повреждения цистерн с ЖРО, по консервативному сценарию возможно повреждения ядерного реактора, РМ поступают в окружающую среду, происходит радиационное заражение.

II Вариант. Толщина эквивалентной стальной преграды с учетом корпусных конструкций и фиктивных преград согласно формулы 3.19 составила, мм:

$$\delta_{э2} = (22+2+2+2)+(2{,}5\cdot 2{,}5+2{,}5\cdot 5+2{,}5\cdot 2{,}5+2{,}5\cdot 5) = 65{,}5.$$

$$\delta_{э2} > \delta_{Э}$$

Происходит разрушение только внутренних перегородок ПЭБ, ЛБ не разрушен, затопления судна нет, РА не происходит, радиационного заражения не происходит. Таким образом обеспечивается взрывозащищенность ПОО от избыточного давления во фронте ВУВ и защита от РА.

Последствия взрыва баллонов с кислородом и аргоном при осколочном поражении

В помещении баллонов на верхней палубе с ЛБ, согласно проекта ПАТЭС расположены баллоны с кислородом (20 шт.) и аргоном (20 шт.).

Области разрушений, вызванных взрывом баллонов с кислородом и аргоном определены в соответствии с [136], размеры областей разрушений приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Размеры области разрушений при взрыве баллонов с аргоном и кислородом

№ п/п	Наименование	Расположение	Кол.. шт.	Границы разрушений			
				к борту		в нос	к корму
				левому	правому		
1	Баллоны с кислородом	ВП 102-108 шп.	20	Пробьет	12 м	18 м	18 м
2	Баллоны с аргоном	ВП 108-114 шп.	20	Пробьет	5 м	6 м	3 м

Результаты расчетов показывают, что наиболее тяжелые последствия имеет взрыв баллона с кислородом. В результате взрыва баллона с кислородом пробивается борт ЛБ ПЭБ, повреждается ГПП на 114 шпангоуте. В зону разрушений попадают: помещение №2 вспомогательных механизмов РДГ, помещение вспомогательных механизмов КО, помещение насосов и цистерн вод дезактивации, помещение холодильников баков ОТВС №2, хранилище ТВС и ТРО, помещение РДГ №2, помещение вспомогательного оборудования, частично помещение компрессоров, агрегатные автоматики №2 и №4, помещение автоматики №4, КО, коридор трубопроводов РУ №2,

помещение холодильных машин, помещение ЩРУ4 и частично помещение ЩРУ2, помещение хранения низкоактивных ТРО, помещение АДГ №2, помещение АДГ №4 и частично помещение АДГ №3. Через пробоину затапливаются 5 (кроме ЗО), 6, 7 отсеки. В зоне затопления оказываются коридор труб №2, помещение свежих ионитов №2, помещение автоматики №4, агрегатные автоматики №2 и №4, помещение холодильников баков ОТВС №2, помещение насосов и вод дезактивации, помещения №1 и №2 вспомогательных механизмов РДГ, помещение вспомогательных механизмов КО, помещения РДГ №1 и №2, помещение вспомогательного оборудования, помещение компрессоров.

Остойчивость ПЭБ при рассматриваемом затоплении отсеков обеспечены. Наибольший крен при данной аварийной ситуации не превысит 9,1°, а дифферент 0,5°. Минимальный надводный борт составляет 0,11 м., что представляет опасность затопления.

Взрыв баллонов с кислородом может привести к повреждение трубопроводов питательной воды и паропроводов РУ №2 и выходу из строя систем автоматики в результате чего сработает АЗ РУ №2. В результате обесточивания ЩРУ2 и ЩРУ4 в каждой РУ останавливаются по два ЦНПК, ЦНР и по одному насосу 3 и 4 контура. Взрыв баллонов с кислородом также приводит к выходу из строя РДГ№2 и №4, ВКУ, а также к повреждению двух цистерн вод дезактивации оборудования, цистерны вод дезактивации помещений.

В результате РУ №2 выводится из действия, в РУ №1 автоматически происходит экстренное снижение мощности до 50% $N_{ном}$. Электроснабжение потребителей РУ, включая потребителей систем безопасности, осуществляется от главного ТА№1 через ГРЩ и ЩРУ1, ЩРУ3. При необходимости обе РУ могут быть выведены из действия и расхоложены через технологические конденсаторы и через системы 3 и 4 контуров. В этом случае электроснабжение потребителей РУ, включая потребителей систем

безопасности, обеспечивается от РДГ №1 и №3 через ГРЩ и ЩРУ1, ЩРУ3. Рассматриваемая аварийная ситуация приводит к радиационным последствиям: из цистерн вод дезактивации оборудования и цистерны вод дезактивации помещений активная вода поступает в отсек хранилищ, через пробоины в ГПП по 114 шпангоут возможно поступление радиоактивной воды в отсек вспомогательных установок.

Для дальнейшего обоснования мероприятий по предупреждению ТА на ПАТЭС на рис. 3.9 представлены причины ТА с кислородными баллонами по материалам [207].

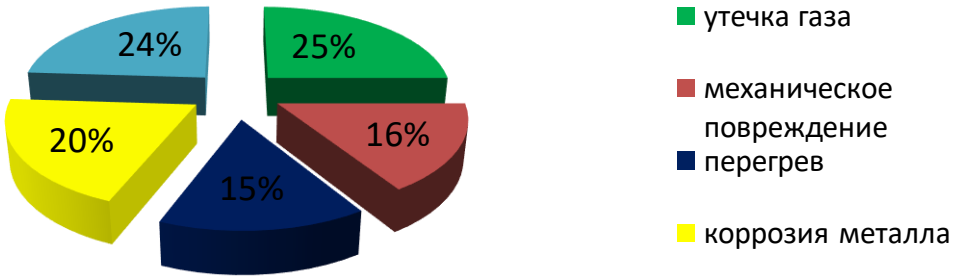

Рис. 3.9 – Основные причины ТА с кислородными баллонами

3.4 Детерминированная оценка радиационных последствий аварии со средствами хранения и транспортировки ЖРО

Детерминированная оценка радиационных последствий выполнена с использованием следующих исходных данных. Объёмы ЖРО составляют: дренажные ёмкости К – 4 шт по 8 м^3 = 32 м^3; цистерны осушения Д – 4 шт по 8 м^3 = 32 м^3; цистерна вод дезактивации блока перегрузки – 40 м^3; баки выдержки – 3 шт по 5,49 м^3 + 1,4 м^3 (вне баков) = 17,9 м^3. Масса теплоносителя I контура –20827 кг.

Консервативно принимается, что состав ЖРО в цистернах соответствует составу радионуклидов I контура. По объемной активности ЖРО на ПАТЭС относится к первой и второй категории – низкоактивные

менее $3.7 \cdot 10^5$ Бк/л и среднеактивные. Содержание радионуклидов в теплоносителе I контура ПАТЭС и их активность приведено в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Содержание радионуклидов в теплоносителе I контура

Радионуклид	**Активность, Бк/кг**
Хром - 51	$1{,}0 \cdot 10^4$
Марганец - 54	$2{,}3 \cdot 10^2$
Марганец - 56	$1{,}7 \cdot 10^4$
Железо - 59	$2{,}3 \cdot 10^2$
Кобальт - 58	$1{,}7 \cdot 10^3$
Кобальт - 60	$4{,}8 \cdot 10^3$
Цирконий - 95	$1{,}9 \cdot 10^3$
Йод - 131	$4{,}4 \cdot 10^6$
Йод - 132	$2{,}0 \cdot 10^8$
Йод - 133	$7{,}0 \cdot 10^7$
Йод - 134	$4{,}4 \cdot 10^8$
Йод - 135	$1{,}4 \cdot 10^8$
Цезий - 134	$5{,}6 \cdot 10^5$
Цезий - 137	$6{,}0 \cdot 10^5$

В таблице 3.7 приведена максимальная объёмная активность ЖРО и определяющих её дозообразующих радионуклидов.

Таблица 3.7 - Максимальная объёмная активность ЖРО и определяющих её дозообразующих радионуклидов

Активность, 10^4 Бк/кг						
Продукты коррозии		Продукты деления				Сумма
^{54}Mn	^{60}Co	$^{90}Sr+^{90}Y$	^{134}Cs	$^{137}Cs+^{137m}Ba$	$^{144}Ce+^{144}Pr$	

Кроме того, в работе проведена оценка радиационного заражения местности в соответствии с методическими рекомендациями [9, 19, 71]. В рамках консервативного подхода принимается, что в результате пожара и взрыва возникают нарушения в барьерах безопасности. Возникает запроектная радиационная авария с выходом РМ наружу. В результате образования пробоины в левом борту происходит затопление судна, по консервативному сценарию поврежден ядерный реактор, возможны повреждения цистерн с ЖРО, РМ поступают в окружающую среду, происходит радиационное заражение.

Доза облучения рабочей смены ПАТЭС, рад/ч:

$$Д_{ВН.ВЗР} = \frac{Д_{ВН.ДЕТ.}}{1,7}, \tag{3.20}$$

где $Д_{вн.дет.}$ – доза облучения внутренняя детская, определяется по таблице 3.8 (0,9 Зв).

Таблица 3.8 - Доза облучения внутренняя детская, $Д_{вн.дет.}$ [9]

Расстояние от АЭС, км	Доза облучения на каждые сутки выхода РВ (Зв)								
Время выхода РВ, сут.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0,9	1,4	1,8	2,1	2,3	2,5	2,6	2,7	2,7
6	0,7	1,1	1,4	1,6	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1
8	0,4	0,7	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4
10	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
15	-	-	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
20	-	-	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Согласно формулы (3.20):

$Д_{вн.взр.} = \frac{0.9}{1.7} = 0.5$ Зв – зона радиационной опасности.

Рабочая смена 70 человек попадает под воздействие опасного радиоактивного заражения. В рамках консервативного подхода принимается, что рабочая смена получает опасную дозу радиации.

Радиационное заражение населения:

Мощность дозы излучения определяется по таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Мощность дозы излучения на оси следа, рад/ч [9]

Расстояние от ЯЭР(АЭС), Х, км	Категория устойчивости атмосферы				
	А	Д		F	
	Средняя скорость ветра, м/с				
	2	5	10	5	10
5	1,24	0,803	0,475	$3{,}90 \cdot 10^{-6}$	$2{,}35 \cdot 10^{-6}$
10	0,723	0,466	0,285	$3{,}65 \cdot 10^{-3}$	$2{,}37 \cdot 10^{-3}$
20	0,289	0,189	0,119	0,0372	0,0248
30	0,172	0,127	0,0812	0,0528	0,0370
40	0,121	0,103	0,0667	0,0527	0,0385

Мощность дозы излучения на оси следа D_{xi} = 0,803 рад/ч.

По таблице 3.10 определяются размеры зоны радиоактивного заражения местности:

Таблица 3.10 - Размеры зон РЗ при гипотетической аварии [9]

Класс устойчивости атмосферы	Скорость ветра, м/с	Зона опасного РЗ $Д_{вн.дет.}$ = 0,3-2,5 зв.		Зона чрезвычайно опасного РЗ $Д_{вн.дет}$>2,5зв.	
		Длина, км	Ширина, км	Длина, км	Ширина, км
Д	1-2	-	-	-	-
Е	1-4	17,0	1,4	5,0	0,4
Д	3-5	9,0	0,9	-	-
Д	5-1,2	6,0	0,6	-	-
В, С	1-5	7,0	1,7	-	-
F	1-3	25,0	1,0	9,0	0,5
А	1	4,0	1,0	-	-

При классе устойчивости атмосферы Д и скорости ветра 5 м/с длина зоны радиационного заражения составляет 9 км, ширина – 0,9 км. Тогда мощность дозы излучения в заданной точке по формуле в соответствии с [220]:

$$D = D_{xi} \cdot K_t \cdot K_y \cdot K_w, \qquad (3.21)$$

где K_y — коэффициент для определения мощности дозы излучения (K_y=0,17);

K_t — коэффициент для пересчета мощности дозы по времени после аварии (K_t =1);

$$K_w = 10^{-4} \cdot n \cdot W \cdot \xi$$

n — количество аварийных ядерных энергетических реакторов;

W — электрическая мощность ядерного реактора;

ξ — доля радиоактивных веществ, выброшенных при аварии (100%).

$K_w = 10^{-4} \cdot 1 \cdot 70 \cdot 1 = 0{,}007$.

$D = 0{,}803 \cdot 1 \cdot 0{,}17 \cdot 0{,}01 = 0{,}001$ рад/ч – зона умеренного заражения.

На рисунке 3.10 показана зона радиоактивного заражения при ТА.

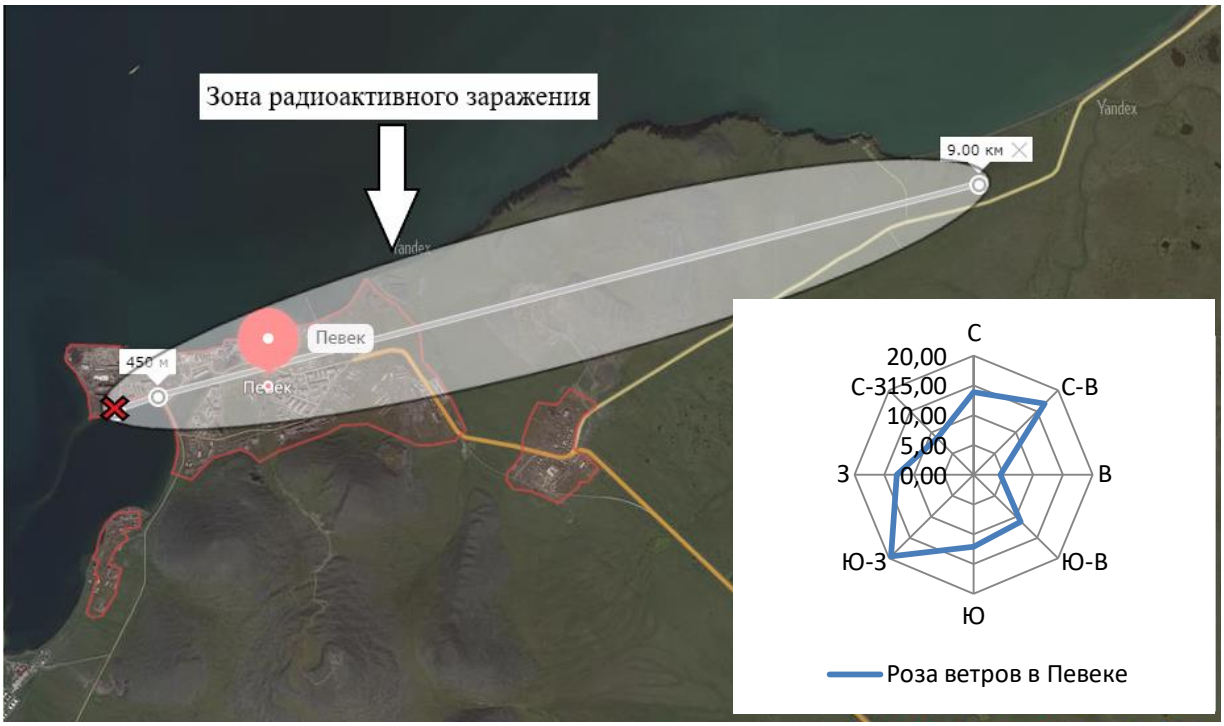

Рис. 3.10 - Размер зоны радиоактивного заражения в результате радиационной аварии на ПАТЭС

Место расположения ПАТЭС, и роза ветров в районе п. Певек позволяет спрогнозировать, что практически весь жилой сектор попадает в зону РЗ с размерами зоны радиоактивного заражения:

площадь зоны заражения: 0,9·9=8,1 км^2;

площадь жилого сектора в зоне заражения: 5,6 км^2;

численность населения в зоне РЗ: 60,19·5,6 + 80 = 418 чел;

всего пострадавших: 418+70=488 чел.

3.5 Выводы по главе 3

В ходе работы разработаны возможные варианты развития проектных и запроектных аварийных ситуаций, при которых возможно нарушение герметичности котла цистерны с ЖРО и возникновение РА. Разработаны десять сценариев запроектных аварийных ситуаций с ЖРО на ПАТЭС при перевозке РМ, из которых два сценария ведут к РА и выходу содержимого емкостей с ЖРО в окружающую среду. Предложено формализованное представление структуры развития техногенной аварии с помощью метода дерева событий, позволяющее сформировать комплекс сценариев.

В ходе исследования определены основные поражающие факторы источников ЧС, сценарии их действия на СХПРЖО, представлен детерминированный расчет параметров ПФ и зон поражения от их действия при пожаре, взрыве и выходе РМ в окружающую среду. Обобщая сказанное, следует отметить, что проведенный морфологический анализ поражающих факторов источников ЧС, позволил выделить их классификационные признаки и структуру, что в свою очередь позволяет обосновывать физические процессы и явления, протекающие при техногенных авариях на ПАТЭС и на этой основе разрабатывать методы математического моделирования этих процессов и решать вопросы повышения их защищённости.

Так как на практике экспериментально установлена сильная вариабельность эффектов на действие ПФ источников ЧС на однотипные объекты, то в теории воздействия ПФ источников ЧС необходимо широко использовать методы теории вероятностей. Поэтому следующая глава посвящена исследованию этих вопросов.

Глава 4 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИЗОЛИРОВАННОГО И КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ ПРИ ТА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ РМ В МП

4.1 Теоретические методы исследования воздействия поражающих факторов на технические объекты

В различных областях практической и научной деятельности при проведении большого количества реальных или гипотетических (мысленных) экспериментов в одинаковых условиях получают различные результаты. Результат эксперимента обычно может быть охарактеризован одним или несколькими основными признаками, которые имеют те или иные количественные характеристики. Если же результат эксперимента характеризуется качественными признаками, то, применяя некоторую условную систему обозначений, этим качественным признакам можно придать количественные значения.

Приведем примеры некоторых событий:

эффект при попадании осколка разрушенных промышленных конструкций ПАТЭС в борт ПЭБ;

первичные признаки поражения при воздействии на человека некоторой дозы ионизирующего излучения;

эффект при комбинированном действии двух поражающих факторов источников чрезвычайных ситуаций,

эффект при воздействии воздушной ударной волны и т.п.

Если законы, описывающие те или иные явления известны, достаточно просты и устойчивы, т.е. имеют большую способность к воспроизведению, то мы можем предсказать результат того или иного эксперимента.

Например, если точно известна зависимость скорости движения осколка при техногенном взрыве от времени $V(t)$, то пройденный осколком путь за интервал времени от t_1 до t_2 описывается следующим законом

$$S(t) = \int_{t_1}^{t_2} V(t)dt, \tag{4.1}$$

Аналогичным законом выражается и кинетическая энергия осколка промышленных конструкций, имеющего массу m и скорость ν, которая расходуется на деформацию материала, объём которого равен произведению площади сечения S и толщины материала s выбитой пробки. Фактическая удельная энергия, то есть энергия, приходящаяся на единицу объёма разрушаемой преграды, в данном случае будет равна $\frac{mv^2}{2Ss}$, а условие пробития преграды будет определяться соотношением

$$\frac{mv^2}{2Ss} = E_1, \tag{4.2}$$

В реальных условиях законы изменения переменных, входящих в уравнения (4.1) и (4.2) могут быть точно неизвестны, поэтому предсказать (оценить, рассчитать) соответствующую количественную характеристику абсолютно точно не представляется возможным. В этих и других аналогичных случаях результаты испытания обнаруживают нерегулярность от случая к случаю.

Таким образом, в последовательности случайных экспериментов невозможно предсказать результат каждого, так как в результатах каждого из них обнаруживаются случайные колебания, не поддающиеся точному учету из-за влияния многих факторов. Однако если рассмотреть достаточно большую последовательность экспериментов в целом, то обнаруживается очень важное ее свойство —– средние результаты случайных экспериментов являются очень устойчивыми, что позволяет применить математические методы для описания этих явлений.

Теория вероятностей начинает работать тогда, когда законы, описывающие те или иные явления, недостаточно хорошо изучены, количество факторов, влияющих на результаты испытания, слишком велико, а сами факторы также не могут характеризоваться достаточно точно.

Рассмотрим воздействие какого-либо ПФ источников ЧС на большую совокупность однотипных объектов. При этом могут быть различные постановки задачи о поражении этих объектов. Рассмотрим только две возможные из них.

Первая задача. На совокупность однотипных объектов воздействует одна и та же величина поражающего фактора. В силу индивидуальных особенностей объектов на реакцию от воздействия поражающего фактора, у каждой из них будет наблюдаться различная тяжесть поражения, поэтому количественная характеристика тяжести поражения является случайной величиной. В настоящее время обоснование количественных показателей, как случайных величин, характеризующих тяжесть поражения и методы их описания, не разработаны. Обычно на качественном уровне вводится понятие степеней повреждения (для объектов техники) и разрушения (для инженерных сооружений).

«По тяжести нарушения условий нормального функционирования объекта условно выделяют четыре степени поражения:

легкая степень (первая) — временное снижение защищённости, восстановление которой осуществляется силами экипажа в эксплуатационных условиях;

средняя степень (вторая) — длительная потеря защищенности, восстановление которой осуществляется с привлечением ремонтных подразделений;

тяжелая степень (третья) — сильное разрушение объектов, требующие капитального ремонта в стационарных условиях;

крайне тяжелая степень (четвертая) — полное разрушение (уничтожение) объекта» [218].

В этом случае в качестве события будем рассматривать появление поражения у объекта конкретной степени тяжести (например, третьей).

Вторая задача. Каждый из однотипных защищаемых объектов при воздействии на них поражающего фактора должен получить один и тот же уровень поражения (заданную степень тяжести поражения). В силу индивидуальных особенностей объектов для достижения заданного эффекта поражения, каждого из них потребуется своя величина поражающего фактора. В связи с этим, величина поражающего фактора, вызывающую заданный эффект поражения, является случайной и необходимо уметь описывать такие случайные величины. Необходимо отметить, что эффекты поражения должны наступать к заданном моменту времени на продолжительность не менее требуемой, поэтому важной характеристикой поражающего фактора, кроме ПФ мгновенного действия, является время проявления эффектов поражения. Рассматривая поражающий фактор с точки зрения его способности поражать объект, можно сказать, что наиболее полными характеристикой поражающего фактора в данном случае являются факторные законы воздействия (поражения).

Наиболее полная характеристика случайной величины

Наиболее полной характеристикой любой случайной величины является закон ее распределения, который может задаваться в одном из двух видов: в виде функции распределения вероятностей случайной величины (интегральная функция) и в виде функции плотности распределения вероятностей для непрерывной случайной величины (дифференциальная функция) или ряда распределения для дискретной случайной величины [230, 231, 232].

Многомерная случайная величина и законы ее распределения

Если результат испытания характеризуется не одной, а несколькими случайными величинами, то говорят о многомерной случайной величине и законе ее распределения, который также может задаваться в одном из двух видов: в виде функции распределения вероятностей (интегральная функция) и плотности распределения для непрерывных величин (дифференциальная функция).

4.2 Методы описания действия ПФ источников ЧС при изолированном действии (одномерный случай)

В качестве числовой характеристики ПФ источника ЧС, вызывающего поражение заданной степени тяжести, могут использоваться различные параметры функций распределения: математическое ожидание, медиана, мода, среднеквадратичное отклонение и т. п. Связь между вероятностью поражения СПХЖРО не ниже заданной степени тяжести и величиной действующего на них ПФ определяется ФЗВ. При воздействии на однотипные объекты ПФ у каждого из них необходимо достигнуть определенный эффект воздействия. Однако в силу индивидуальных особенностей объектов для достижения заданного эффекта воздействия каждому из них потребуется вполне определенная своя величина поражающего воздействия. В связи с этим можно утверждать, что величина воздействия, вызывающая заданный, изучаемый эффект (отклик) объекта на воздействие энергии и вещества ПФ источника ЧС является непрерывной случайной величиной. Достоинством статистических моделей является их применимость практически к любой задаче со случайными исходами и возможность получения требуемой точности.

Известно, что наиболее полной характеристикой случайной величины является закон ее распределения, который может быть задан в одном из двух видов: в виде плотности распределения вероятностей случайной величины (плотность вероятности или дифференциальная функция распределения

случайной величины) и функции распределения вероятностей случайной величины (функция распределения или интегральная функция распределения случайной величины). Дифференциальная функция *φ(D)* распределения случайной величины *D* – негативного действия ПФ источника ЧС, вызывающей у объекта заданный эффект воздействия схематично показана на рисунке 4.1.

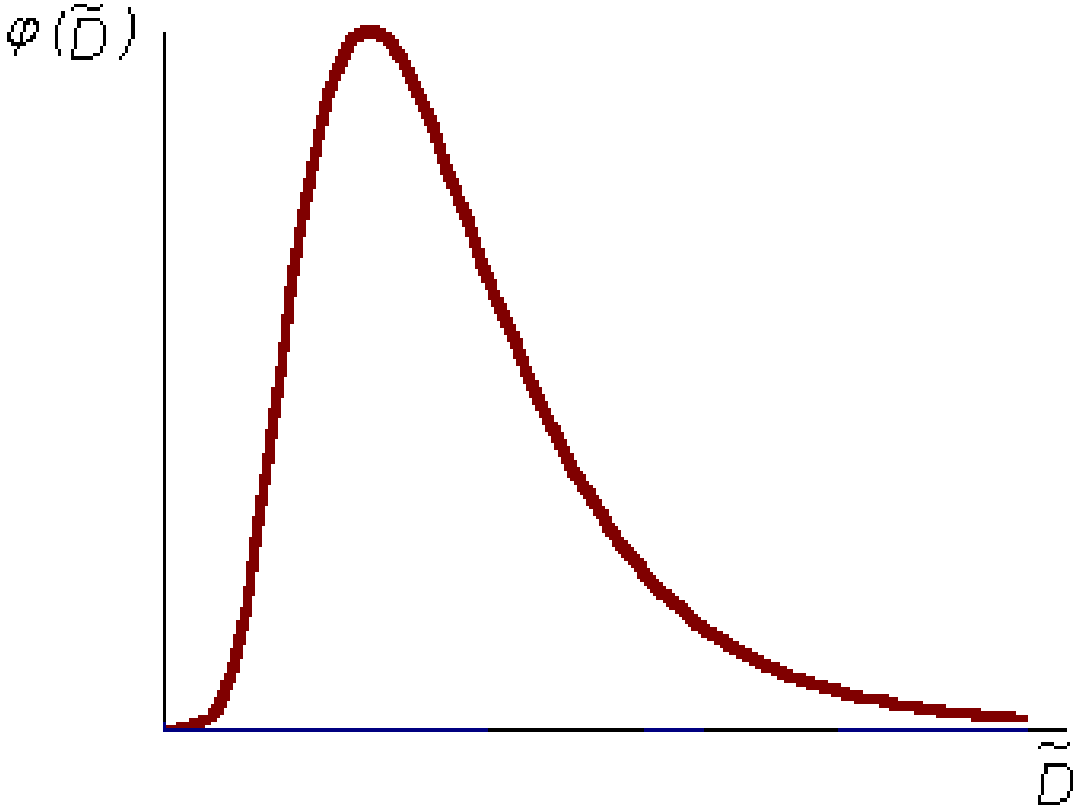

Рис. 4.1 - Плотность распределения вероятности случайной величины ПФ, вызывающей заданный эффект воздействия

Она характеризует долю объектов, у которых величина ПФ источника ЧС, вызывающая заданный эффект воздействия оказалась в интервале от *D* до *D*+*dD*

$$\varphi(\tilde{D}) = \frac{dN}{NdD} \tag{4.3}$$

Интегральная функция распределения *F(D)* этой случайной величины схематично представлена на рис. 4.2. В данном случае, исходя из определения, функция распределения *F(D)* есть ни что иное, как вероятность

того, что случайная величина ПФ, вызывающая у объекта заданный эффект воздействия, будет меньше некоторой величины, т.е. $F(D) = P(\tilde{D} < D)$.

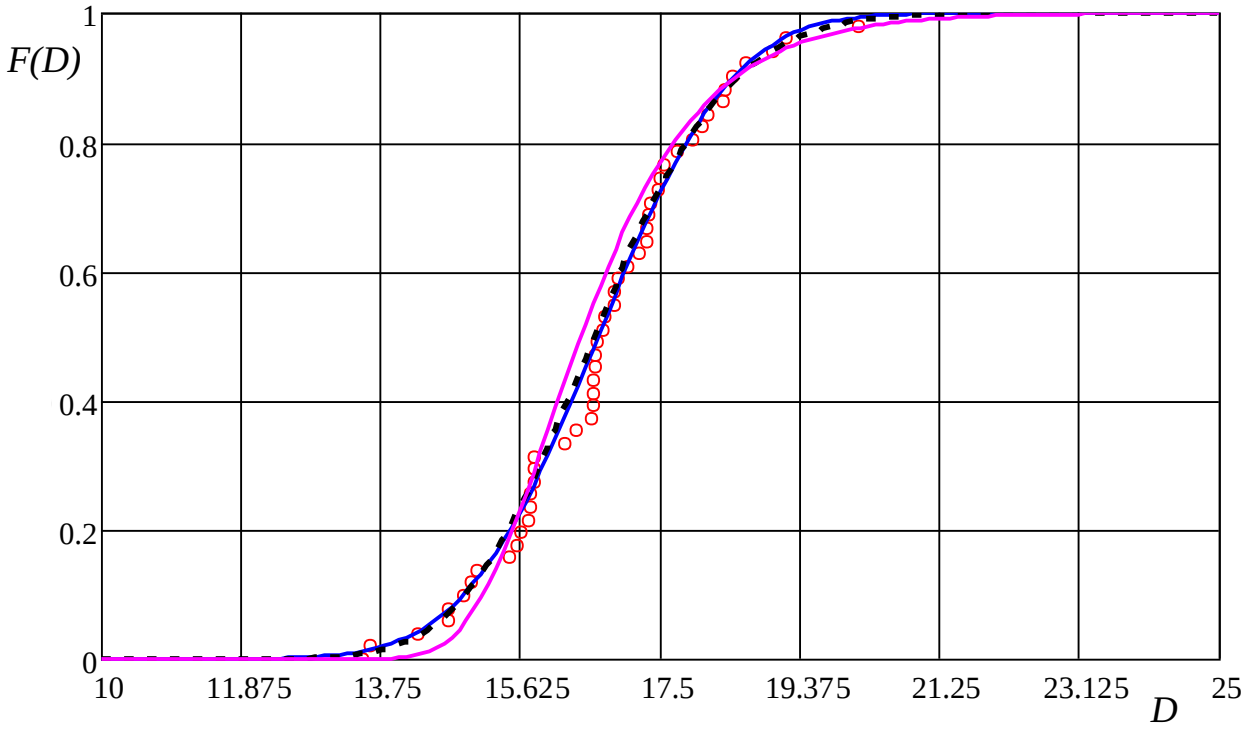

Рис. 4.2 - Пример построения функции распределения вероятности случайной величины ПФ источника ЧС, вызывающей заданный эффект воздействия

Тогда (рис. 4.3), при воздействии на объект некоторой величины D ПФ источника ЧС с вероятностью P, равной $F(D)$, величина ПФ, вызывающая у объекта заданный эффект воздействия (эффект заданной силы), будет меньше действующей.

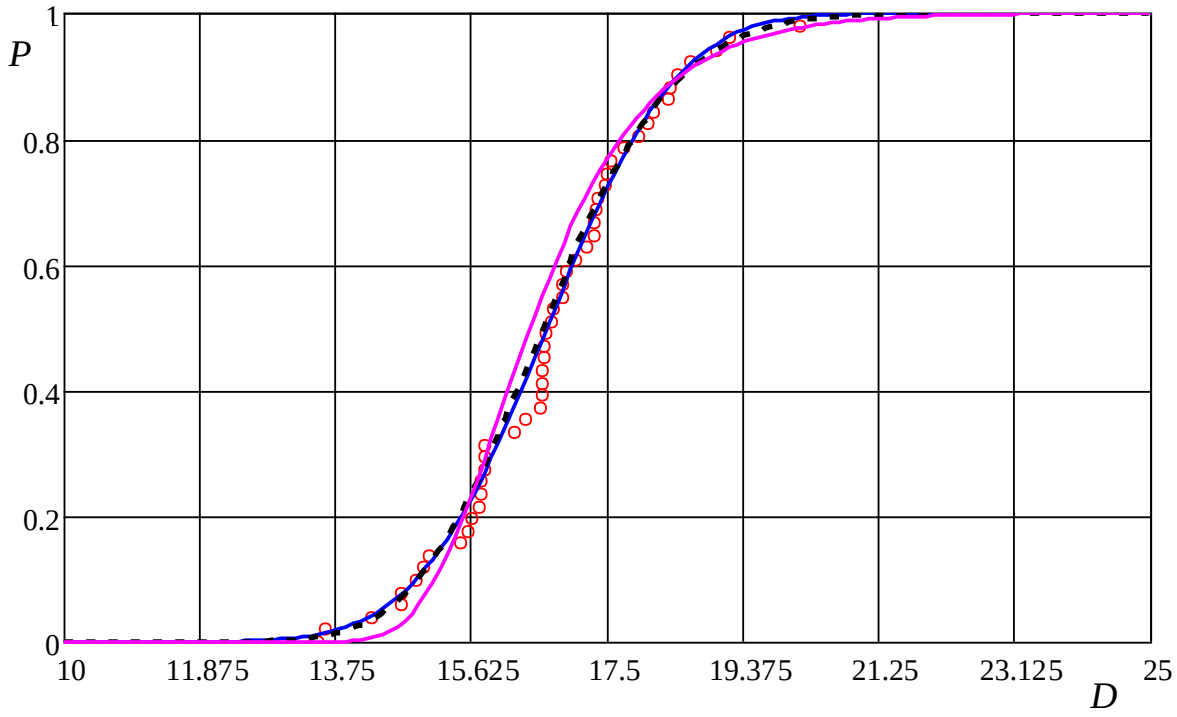

Рис. 4.3 - Зависимость между вероятностью проявления эффектов не ниже заданного и величиной ПФ источника ЧС

Поэтому, с вероятностью *P=F(D)* у объекта проявятся эффекты не ниже заданного (не ниже заданной силы).

Зависимость между вероятностью проявления эффектов не ниже заданного и величиной ПФ источника ЧС, действующих на объект, будем называть факторным законом воздействия.

В самом общем случае он имеет вид:

$$P = \int_0^D \varphi(\tilde{D}) d\tilde{D} \tag{4.4}$$

Рассмотрим теоретические методы описания действия ПФ источников ЧС при изолированном действии в одномерном случае.

Выдвинем научную гипотезу, что для физических ПФ связь между величиной воздействия и вероятностью того, что объект получит поражение не ниже заданной степени тяжести, описывается логарифмически нормальным законом.

Подтверждение или опровержение выдвинутой гипотезы и конкретного вида теоретического ФЗВ определяется по экспериментальным данным с использованием специальных испытаний (рассмотрено в 5 главе).

Логарифмически нормальный закон — функция плотности распределения случайной величины ПФ, применительно к рассматриваемой задаче, имеет следующий вид:

$$\varphi\left(\tilde{D}\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}D\sigma_{lnD}}e^{-\frac{\left(ln\tilde{D}-lnD_{50}\right)^2}{2\sigma_{lnD}^2}} \tag{4.5}$$

ФЗВ в этом случае может быть записан следующим образом:

$$P=\int_0^D\frac{1}{\sqrt{2\pi}D\sigma_{lnD}}e^{-\frac{\left(ln\tilde{D}-lnD_{50}\right)^2}{2\sigma_{lnD}^2}}d\tilde{D}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{lnD}}\int_0^D e^{-\frac{\left(ln\tilde{D}-lnD_{50}\right)^2}{2\sigma_{lnD}^2}}dln\tilde{D} \tag{4.6}$$

По аналогии с нормальной плотностью, для логарифмически нормальной плотности распределения случайной величины ПФ, вызывающей заданный эффект воздействия, ФЗВ с использованием функции Лапласа, удвоенной функции Лапласа и интеграла ошибок может быть записан следующим образом:

с использованием функции Лапласа

$$P=\Phi\left(\frac{1}{\sigma_D}ln\frac{D}{D_{50}}\right)=\Phi\left(\frac{\sqrt{k}}{\sqrt{2}}lnT\right) \tag{4.7}$$

с использованием удвоенной функции Лапласа

$$P=0.5\left[1+F\left(\frac{1}{\sigma_D}ln\frac{D}{D_{50}}\right)\right]=0.5\left[1+F\left(\frac{\sqrt{k}}{\sqrt{2}}lnT\right)\right] \tag{4.8}$$

с использованием интеграла ошибок (функции Крампа)

$$P=0.5\left[1+erf\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_D}ln\frac{D}{D_{50}}\right)\right]=0.5\left[1+erf\left(\sqrt{k}\,lnT\right)\right] \tag{4.9}$$

где $T=\frac{D}{D_{50}}$ – вводится безразмерная величина, характеризующая величину D_{50} ПФ источника ЧС, действующего на объект;

$\sqrt{k}$ – параметр закона

$$\sqrt{k} = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_{ln\,D}} \tag{4.10}$$

Как и у нормального, параметры логарифмически нормального факторного закона воздействия имеют статистическую и прикладную трактовки. Статистическая трактовка (статистический смысл) параметров логарифмически нормального ФЗВ:

D_{50} — медианное значение случайной величины ПФ источника ЧС, вызывающей у объекта заданный эффект воздействия (заданный отклик);

$\sigma_{\ln D}$ — среднее квадратическое отклонение натурального логарифма случайной величины ПФ источника ЧС, вызывающей у объекта заданный эффект воздействия (заданный отклик).

Прикладная трактовка параметров логарифмически нормального ФЗВ сточки зрения теории воздействия ПФ источников ЧС техногенного характера:

D_{50} — величина физического ПФ источника ЧС, при воздействии которого с вероятностью 0.5 у объекта будет наблюдаться отклик (эффект воздействия) не ниже заданной силы;

$\sigma_{\ln D}$ или $\sqrt{k}$ — характеризует однородность (разнородность) однотипных объектов: чем меньше $\sigma_{\ln D}$ (больше $\sqrt{k}$), тем более однородны однотипные объекты к воздействию ПФ и наоборот, чем больше $\sigma_{\ln D}$ (меньше $\sqrt{k}$), тем более разнородны однотипные объекты к воздействию данного ПФ источника ЧС).

Закон Вейбулла-Гнеденко проявляется в объектах, разрушение которых определяется предельным отклонением (модель слабого звена). Разрушение исследуемой преграды может происходить при разной нагрузке. Если ресурс исследуемого объекта в целом определяется наиболее слабым его участком, то справедлива модель слабого звена.

Закон Вейбулла-Гнеденко — функция плотности распределения случайной величины ПФ источника ЧС, применительно к рассматриваемой задаче имеет следующий вид [227]

$$\varphi\left(\tilde{D}\right)=\lambda\gamma\tilde{D}^{\gamma-1}e^{-\lambda\tilde{D}^{\gamma}} \tag{4.11}$$

В этом случае ФЗВ будет иметь вид

$$\mathrm{P}=\int_{0}^{D}\lambda\gamma e^{-\lambda\tilde{D}^{\gamma}}\,\mathrm{d}\tilde{\mathrm{D}} \tag{4.12}$$

Сделав замену переменной $u=\lambda\tilde{D}^{\gamma}$, придем к табличному интегралу

$$\mathrm{P}=\int_{0}^{u}e^{-u}\,\mathrm{du} \tag{4.13}$$

откуда

$$\mathrm{P}=1-e^{-u}=1-e^{-\lambda D^{\gamma}} \tag{4.14}$$

Последнее выражение можно записать следующим образом

$$\mathrm{P}=1-e^{-\left(\frac{D}{D_{50}}\right)^{\gamma}ln2} \tag{4.15}$$

Параметры закона D_{50} и γ имеют такой же смысл, как и параметры логарифмически нормального закона. Имеются и другие, менее распространенные, модели факторных законов воздействия не только от физических, но и других по природе факторов [230, 231, 232].

Переход от одного ФЗВ к другому можно осуществить методом моментов [227]. Так как рассмотренные законы являются двух параметрическими, то для перехода от одного закона к другому достаточно найти два момента, например, первый начальный m_1 и второй центральный μ_2 моменты случайной величины ПФ источников ЧС, вызывающей заданный эффект воздействия

$$m_1=\int_{0}^{\infty}\tilde{D}\varphi\left(\tilde{D}\right)d\tilde{D};\ \mu_2=\int_{0}^{\infty}\left(\tilde{D}-m_1\right)^2\varphi\left(\tilde{D}\right)d\tilde{D}=m_2-m_1^2 \tag{4.16}$$

где $m_2 = \int_0^{\infty} \tilde{D}^2 \varphi(\tilde{D}) d\tilde{D}$ – второй начальный момент случайной величины физического ПФ источников ЧС, вызывающей заданный эффект воздействия.

Приравнивая, в дальнейшем, соответствующие моменты и решая систему двух уравнений с двумя неизвестными, представляется возможным найти параметры необходимого ФЗВ по известным параметрам другого факторного закона. Первый начальный и второй центральный моменты рассмотренных законов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Моменты случайной величины ПФ источников ЧС, вызывающей заданный эффект воздействия, для различных законов распределения [227]

Закон распределения случайной величины $\tilde{D}$, $\varphi(\tilde{D})$	Моменты	
	первый начальный	второй центральный
Нормальный	$\overline{D}$	σ_D^2
Логарифмически нормальный	$D_{50} e^{\frac{1}{4k}}$	$D_{50}^2 \left(e^{\frac{1}{k}} - e^{\frac{1}{2k}} \right)$
Распределение Вейбулла	$(ln\,2)^{-\frac{1}{\gamma}} \Gamma\left(1+\frac{1}{\gamma}\right) D_{50}$	$(ln\,2)^{-\frac{2}{\gamma}} \left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\gamma}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{\gamma}\right) \right] D_{50}^2$

В отношение рассмотренных ФЗВ следует отметить следующее. Нормальный и логарифмически нормальный закон хорошо взаимозаменяются при небольших значениях параметра $\sigma_{ln\,D}$<0.23 [35], или, что равноценно, при больших значениях параметра $\sqrt{k} > 3$ (рис. 4.4).

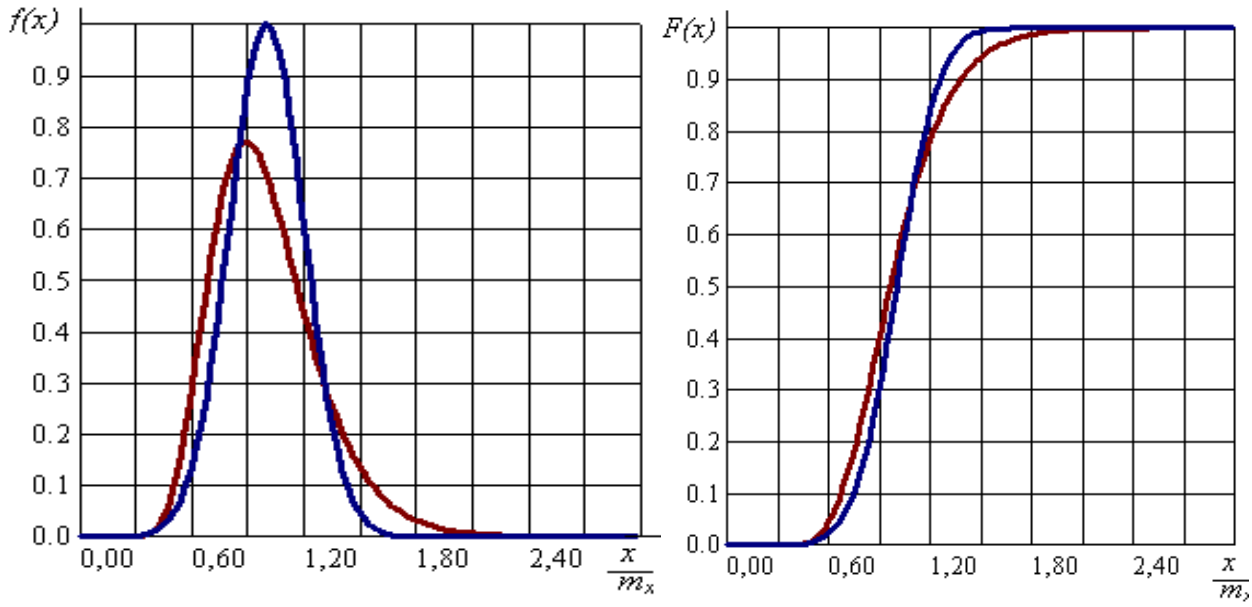

Рис. 4.4 - Взаимозаменяемость нормального и логарифмически нормального законов

В отношении использования нормального закона при описании ФЗВ можно отметить следующее. Как известно, областью определения случайной величины, распределенной по нормальному закону, является вся числовая ось, т.е. $-\infty<x<\infty$. Применительно к рассматриваемому вопросу можно отметить, что величина ПФ источников ЧС является неотрицательной величиной, т.е. ограничена слева нулем. Следовательно, в теоретическом плане, применение нормального закона в качестве ФЗВ является некорректным. Однако, используя правило “трех сигм”, можно, с достаточной для практики точностью, применять нормальный закон в качестве ФЗВ, если среднее квадратическое отклонение случайной величины дозы, вызывающей заданный эффект воздействия у объекта, меньше одной трети математического ожидания этой случайной величины. В противном случае применение нормального закона будет некорректным [227].

Распределение Вейбула также в некоторой области параметров хорошо взаимозаменяется с логарифмически нормальным законом. Именно исходя из этих соображений, вместо трех различных видов ФЗВ целесообразно

использовать один универсальный в широком смысле слова логарифмически нормальный закон.

Таким образом, исходя из изложенного, можно сделать вывод, что наиболее полной характеристикой любого ПФ источников ЧС с точки зрения теории воздействия ПФ источников ЧС является закон распределения случайных величин ПФ источников ЧС, вызывающих заданный эффект воздействия у объекта, или, другими словами, факторный закон воздействия. В качестве ФЗВ целесообразно использовать логарифмически нормальный закон. Распределение Вейбула также в некоторой области параметров хорошо взаимозаменяется с логарифмически нормальным законом. Так как логнормальный закон является двухпараметрическим, то для задания закона достаточно указать его параметры D_{50} и σ_{lnD} или $\sqrt{k}$. Говоря о логарифмически нормальном ФЗВ, следует иметь ввиду, что логарифмы случайных величин ПФ источников ЧС, вызывающих у объектов заданный эффект воздействия, подчинены нормальному закону.

В связи с этим задачу теоретического представления ФЗВ в одномерном случае можно считать решенной.

4.3 Методы описания действия ПФ источников ЧС при комбинированном действии (двумерный случай)

Методы описания действия ПФ источников ЧС при комбинированном действии (двумерный случай). По аналогии с одномерным случаем можно утверждать, что величины негативного воздействия двух ПФ источников ЧС, вызывающих у объекта появление заданного эффекта воздействия, являются случайными и должны характеризоваться двумерной плотностью распределения

$$\varphi\left(\tilde{D}_A, \tilde{D}_B\right) \tag{4.17}$$

Функция распределения вероятностей случайных величин $\tilde{D}_A$ и $\tilde{D}_B$ – величин воздействия ПФ источников ЧС, вызывающих у объекта заданный эффект воздействия, есть вероятность совместного события, состоящего в том, что случайная величина первого ПФ, вызывающая заданный эффект воздействия, будет меньше некоторого значения D_A и случайная величина второго ПФ, вызывающая заданный эффект воздействия, будет также меньше некоторого значения D_B, т.е.:

$$F(D_A, D_B) = P\{\tilde{D}_A < D_A; \tilde{D}_B < D_B\} \tag{4.18}$$

В работе представлен аналитический вид ФЗВ в случае комбинированного действия двух ПФ источников ЧС. По аналогии с одномерным случаем можно выдвинуть гипотезу, что и для двумерного случая логарифмы случайных величин доз ПФ *A* и *B*, вызывающих заданный эффект воздействия у объекта должны распределяться по двумерному логарифмически нормальному закону, который, как известно, в самом общем случае является пятипараметрическим.

С учетом высказанной гипотезы, вероятность проявления эффектов воздействия не ниже заданной силы для нормированных случайных величин ПФ *A* и *B*, запишется следующим образом:

$$P = 1 - \int_{u_A}^{\infty}\int_{v_B}^{\infty} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(u^2-2ruv+v^2\right)} du dv \tag{4.19}$$

где $u_A = \dfrac{\ln D_A - \ln D_{A,50}}{\sigma_A}; v_B = \dfrac{\ln D_B - \ln D_{B,50}}{\sigma_B};$

$$u = \frac{\ln \tilde{D}_A - \ln D_{A,50}}{\sigma_A}; v = \frac{\ln \tilde{D}_B - \ln D_{B,50}}{\sigma_B}.$$

$D_{A,50}$; $D_{B,50}$ — медианные значения случайных величин ПФ *A* и ПФ *B*, вызывающих у объекта заданный эффект воздействия; соответственно;

σ_A, σ_B — среднеквадратичные отклонения натуральных логарифмов случайных величин ПФ *A* и ПФ *B*, вызывающих у объекта заданный эффект воздействия; соответственно;

r — в статистической трактовке коэффициент корреляции логарифмов случайных величин ПФ *A* и *B*, вызывающих заданных эффект воздействия.

Перейдем в формуле 4.19 от нормированных случайных величин *u* и *v* к физическим величинам, т.е. к величинам ПФ. Якобиан в данном случае будет равен

$$I=\begin{vmatrix}\dfrac{\partial u}{\partial \tilde{D}_A} & \dfrac{\partial u}{\partial \tilde{D}_B}\\ \dfrac{\partial v}{\partial \tilde{D}_A} & \dfrac{\partial v}{\partial \tilde{D}_B}\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}\dfrac{1}{\sigma_A\tilde{D}_A} & 0\\ 0 & \dfrac{1}{\sigma_B\tilde{D}_B}\end{vmatrix}=\frac{1}{\sigma_A\sigma_B\tilde{D}_A\tilde{D}_B} \tag{4.20}$$

Тогда вероятность проявления эффектов воздействия не ниже требуемой силы запишется следующим образом

$$P=1-\int_{D_A}^{\infty}\int_{D_B}^{\infty}\frac{1}{2\pi\sigma_A\sigma_B\sqrt{1-r^2}\tilde{D}_A\tilde{D}_B}e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{ln^2\frac{\tilde{D}_A}{D_{A,50}}}{\sigma_A^2}-2r\frac{ln\frac{\tilde{D}_A}{D_{A,50}}ln\frac{\tilde{D}_B}{D_{B,50}}}{\sigma_A\sigma_B}+\frac{ln^2\frac{\tilde{D}_B}{D_{B,50}}}{\sigma_B^2}\right)}d\tilde{D}_A d\tilde{D}_B \tag{4.21}$$

Откуда следует, что совместная плотность распределения случайных величин двух ПФ, вызывающих заданные эффекты воздействия описывается следующим выражением

$$\varphi\left(\tilde{D}_A,\tilde{D}_B\right)=\frac{1}{2\pi\sigma_A\sigma_B\sqrt{1-r^2}\tilde{D}_A\tilde{D}_B}e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{ln^2\frac{\tilde{D}_A}{D_{A,50}}}{\sigma_A^2}-2r\frac{ln\frac{\tilde{D}_A}{D_{A,50}}ln\frac{\tilde{D}_B}{D_{B,50}}}{\sigma_A\sigma_B}+\frac{ln^2\frac{\tilde{D}_B}{D_{B,50}}}{\sigma_B^2}\right)} \tag{4.22}$$

Через величины ПФ *A* и *B* ФЗВ запишется следующим образом

$$P=1-\int_{T_A}^{\infty}\int_{T_B}^{\infty}\frac{1}{2\pi\sigma_A\sigma_B\sqrt{1-r^2}\tilde{T}_A\tilde{T}_B}e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{ln^2\tilde{T}_A}{\sigma_A^2}-2r\frac{ln\tilde{T}_A ln\tilde{T}_B}{\sigma_A\sigma_B}+\frac{ln^2\tilde{T}_B}{\sigma_B^2}\right)}d\tilde{T}_A d\tilde{T}_B \tag{4.23}$$

где совместная плотность распределения случайных величин эффектов имеет следующий вид

$$\varphi\left(\tilde{T}_A,\tilde{T}_B\right)=\frac{1}{2\pi\sigma_A\sigma_B\sqrt{1-r^2}\tilde{T}_A\tilde{T}_B}e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{ln^2\tilde{T}_A}{\sigma_A^2}-2r\frac{lnT_A lnT_B}{\sigma_A\sigma_B}+\frac{ln^2\tilde{T}_B}{\sigma_B^2}\right)} \quad (4.24)$$

Полученные плотности распределения двух случайных величин вида (4.22) и (4.24) являются логарифмически нормальными, в общем случае, для коррелированных логарифмов случайных величин.

Вероятность проявления эффектов воздействия не ниже заданной силы в зависимости от двух поражающих факторов источников ЧС будем называть двумерным ФЗВ (ФЗВ2).

Таким образом ФЗВ при действии двух ПФ описывается с использованием двумерного логарифмически нормального закона распределения случайных величин первого и второго ПФ, вызывающих заданные эффекты воздействия.

Он полностью определяется уже пятью параметрами: к известными для каждого поражающего фактора медианными значениями величин ПФ, вызывающих заданный эффект воздействия $D_{A,50}$ и $D_{B,50}$ и среднеквадратичным отклонением σ_A и σ_B добавляется пятый, неизвестный до настоящего времени, параметр — коэффициент корреляции r, который и отвечает за эффекты синергизма и антагонизма при комбинированном действии двух ПФ.

Если коэффициент корреляции в моделях (4.22) или (4.24) равен нулю, то, совместная функция плотности распределения двух случайных величин D_A и D_B (T_A и T_B) распадется на произведение функций плотностей каждой из них

$$\varphi\left(\tilde{D}_A,\tilde{D}_B\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A\tilde{D}_A}e^{-\frac{ln^2\frac{\tilde{D}_A}{D_{A,50}}}{2\sigma_A^2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_B\tilde{D}_B}e^{-\frac{ln^2\frac{\tilde{D}_B}{D_{B,50}}}{2\sigma_B^2}}=\varphi\left(\tilde{D}_A\right)\varphi\left(\tilde{D}_B\right) \quad (4.25)$$

и логарифмы случайных величин доз (эффектов) двух веществ A и B, вызывающих заданный эффект воздействия, становятся независимыми.

В этом случае вероятность проявления эффектов воздействия не ниже заданной силы будет равна

$$P = 1 - \int_{D_A}^{\infty}\int_{D_B}^{\infty}\varphi(\tilde{D}_A,\tilde{D}_B)d\tilde{D}_A d\tilde{D}_B = 1 - \int_{D_A}^{\infty}\varphi(\tilde{D}_A)d\tilde{D}_A \int_{D_B}^{\infty}\varphi(\tilde{D}_B)d\tilde{D}_B =$$
$$= 1 - \left(1 - \int_0^{D_A}\varphi(\tilde{D}_A)d\tilde{D}_A\right)\left(1 - \int_0^{D_B}\varphi(\tilde{D}_B)d\tilde{D}_B\right) = 1 - [1 - P(D_A)][1 - P(D_B)]. \quad (4.26)$$

Полученная модель представляет собой ни что иное, как вероятность проявления эффектов не ниже заданной силы хотя бы от одного ПФ. Если компоненты нормального двумерного вектора некоррелированы, то они и независимы. Отсюда следует, что выражение (4.26) описывает независимое действие ПФ источников ЧС.

Таким образом, при коэффициенте корреляции логарифмов случайных величин ПФ *A* и *B*, вызывающих заданные эффекты воздействия, равном нулю будем иметь независимое воздействие двух ПФ на объект.

Отсюда можно сделать вывод, что коэффициент корреляции учитывает (описывает) характер совместного действия двух ПФ: усиление, ослабление или независимое действие и должен рассматриваться в качестве физической, неизвестной до настоящего времени, характеристики.

Проведем качественный анализ ФЗВ2 в виде (4.21) или (4.23) в зависимости от знака коэффициента корреляции.

При действии синергетиков, когда должно наблюдаться усиление совместного действия двух ПФ, вероятность проявления эффектов воздействия, по сравнению с независимым действием этих же ПФ, когда параметр модели *r* равен нулю, должна увеличиться. Возрастание вероятности *P* в моделях ФЗВ2 (37) и (39) по сравнению с r=0 при прочих равных условиях, т.е. при заданных значениях доз D_A и D_B веществ *A* и *B,* или, что тоже самое, эффектов T_A, T_B возможно, если коэффициент корреляции будет меньше нуля (r<0). И наоборот, при действии антагонистов должно наблюдаться уменьшение вероятности проявления эффектов по

сравнению с r=0 при прочих равных условиях. Это возможно если коэффициент корреляции в моделях ФЗВ2 (4.22) и (4.24) будет положительным (r>0).

Таким образом, на уровне ФЗВ2 усиление эффектов воздействия (синергизм) при фиксированных величинах ПФ A и B проявляется в возрастании вероятности появления эффектов воздействия не ниже требуемых, а ослабление эффектов воздействия (антагонизм) проявляется в уменьшении вероятности появления эффектов воздействия, не ниже требуемых по сравнению с независимым действием двух веществ. Независимое действие двух веществ проявляется в вероятности, которая находится как вероятность наступления эффектов, не ниже требуемых хотя бы от одного ПФ.

По аналогии с различной трактовкой параметров одномерного факторного закона воздействия D_{50} и $\sqrt{k} = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma}$ коэффициент корреляции r в ФЗВ2 также может иметь статистическую и прикладную (с точки зрения теории воздействия ПФ источников ЧС техногенного характера) трактовки. Статистическая трактовка параметра r — это коэффициент корреляции логарифмов случайных величин доз двух ПФ, вызывающих у объекта заданный эффект воздействия.

Прикладная трактовка параметра r в теории воздействия ПФ источников ЧС — это коэффициент совместного действия (КСД), который связан с характером совместного действия двух физических ПФ (рис.4.5):

для синергетиков, т.е. при усилении совместного действия двух ПФ, коэффициент корреляции будет отрицательным и находиться в интервале $-1 \le r < 0$, при чем в предельном случае при r = -1 будет наблюдаться самое мощное усиление совместного действия;

при независимом действии ПФ коэффициент корреляции равен нулю r=0;

для антагонистов, т.е. при ослаблении совместного действия двух ПФ, коэффициент корреляции будет положительным и находиться в интервале $0 < r \leq 1$, при чем в предельном случае при r = 1 будет наблюдаться самое мощное ослабление совместного действия этих ПФ.

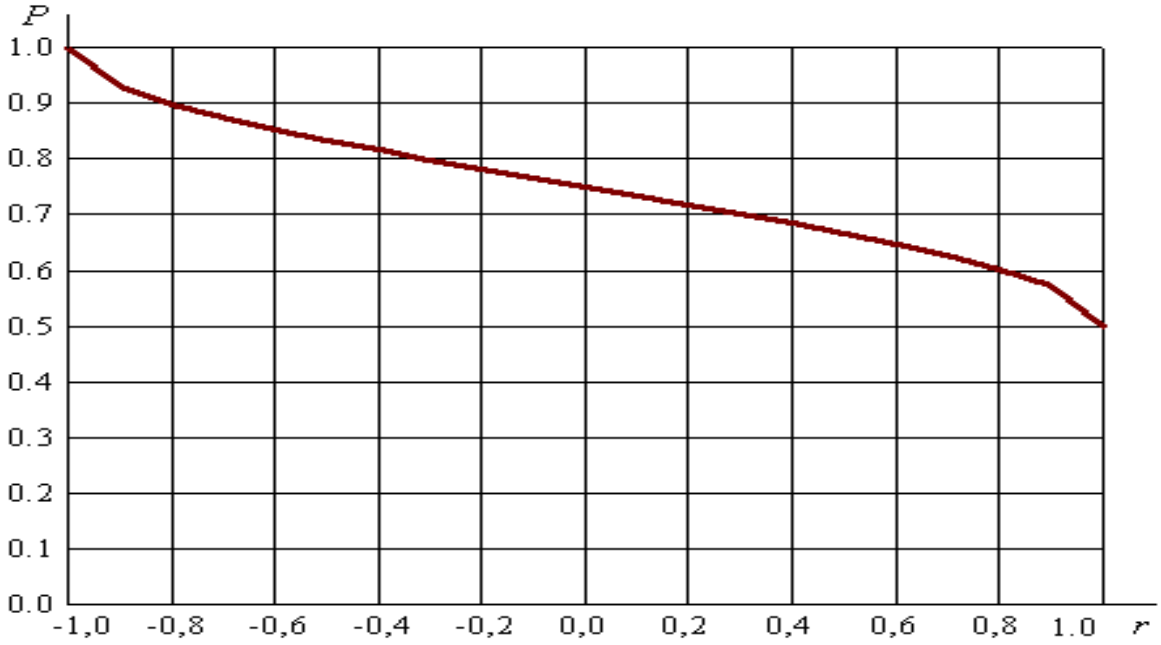

Рис. 4.5 - Коэффициент совместного действия (КСД), который связан с характером совместного действия двух физических ПФ

Таким образом, ФЗВ при действии двух ПФ описывается с использованием двумерного логарифмически нормального закона распределения случайных величин первого и второго поражающего фактора, вызывающих заданные эффекты воздействия.

Он полностью определяется уже пятью параметрами: к известными для каждого поражающего фактора медианными значениями доз, вызывающих заданный эффект воздействия $D_{A,50}$ и $D_{B,50}$ и среднеквадратичным отклонением σ_A и σ_B добавляется пятый, неизвестный до настоящего времени, параметр – коэффициент корреляции r, который и отвечает за эффекты синергизма и антагонизма при комбинированном действии двух ПФ.

В связи с этим задачу теоретического представления ФЗВ в двумерном случае можно считать решенной.

4.4 Выводы по 4 главе

Разработаны теоретические вероятностные методы для описания изолированного и комбинированного действия физических ПФ на человека и технические объекты при ТА при транспортировании РМ в МП. Показано, что наиболее полной характеристикой величины ПФ, вызывающей заданную степень тяжести поражения объекта, является его функция распределения.

Таким образом, исходя из изложенного, можно сделать вывод, что наиболее полной характеристикой поражающего фактора источника ЧС с точки зрения безопасности в ЧС является закон распределения случайных величин доз негативного воздействия ПФ, вызывающих заданный эффект воздействия у объекта, или, другими словами, факторный закон воздействия. В качестве ФЗВ для одномерного случая целесообразно использовать логарифмически нормальный закон.

Так как этот закон является двухпараметрическим, то для задания закона достаточно указать его параметры D_{50} и σ_{lnD}. Говоря о логарифмически нормальном ФЗВ, следует иметь ввиду, что логарифмы случайных величин доз, вызывающих у объектов заданный эффект воздействия, подчинены нормальному закону.

В связи с этим задачу представления теоретического ФЗВ в одномерном случае можно считать решенной.

Факторный закон воздействия при действии двух ПФ теоретически может быть представлен с использованием двумерного логарифмически нормального закона распределения случайных величин доз первого и второго поражающего фактора, вызывающих заданные эффекты воздействия.

Он полностью определяется уже пятью параметрами: к известным для каждого поражающего фактора медианным значениям величин ПФ,

вызывающих заданный эффект воздействия $D_{A,50}$ и $D_{B,50}$ и среднеквадратичным отклонением σ_A и σ_B добавляется пятый, неизвестный до настоящего времени, параметр – коэффициент корреляции r, получившего в теории воздействия ПФ источников ЧС название коэффициента совместного действия, который и отвечает за эффекты синергизма и антагонизма при комбинированном действии двух ПФ.

В связи с этим задачу теоретического описания ФЗВ в двумерном случае можно считать решенной.

Следующим шагом исследования является экспериментальная проверка гипотезы вида предложенного ФЗВ, которая представлена в следующей главе.

Глава 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ ПРЕДЛОЖЕННОГО ФЗВ В ФОРМЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКИ НОРМАЛЬНОГО ЗАКОНА

5.1 Математическая модель пробивного действия осколков при взрыве газовых баллонов с учетом ФЗВ

«Пробивное действие является наиболее типичным и многообразным видом поражающего действия и включает в себя такие виды поражения, как различного рода механические разрушения отдельных элементов конструкции жизненно важных агрегатов цели. Например, пробивное действие осколков, попавших в двигатель, проявляется в виде механических повреждений турбины, компрессора, топливных насосов и фильтров, различного рода приводов; перебития жгутов электропроводки, трубопроводов топливной и маслосистемы двигателя, тяг и тросов управления двигателем и т.п. Одним из проявлений этого вида действия осколков является также поражение живой силы. Характер и степень механических повреждений, наносимых осколком различным поражаемым элементам цели, определяются в первую очередь толщиной преграды, которую должен пробить осколок, имеющий заданную скорость удара и данную массу. В ряде случаев для оценки степени поражения необходимо также знать площадь пробоины, оставляемой осколком в преграде. Так как форма осколка и его ориентация в момент удара о преграду являются величинами случайными, то будут случайными и площадь пробоины, оставляемая осколком в преграде, и толщина пробиваемой преграды, значение которой при прочих равных условиях определяется величиной площади поперечного сечения осколка в момент удара о преграду. Таким образом, если известно, что для поражения того или иного агрегата цели необходимо пробить какой-то элемент его конструкции толщиной h и оставить в нем пробоину площадью не менее S, то осколок массой m,

имеющий заданную скорость в момент удара v, может поразить этот агрегат цели лишь с некоторой вероятностью. Необходимые для оценки пробивного действия осколков количественные соотношения, позволяющие определить искомую вероятность, могут быть получены на основе теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением явления взаимодействия осколков с преградой» [233].

В ходе исследования были разработана модель радиационной аварии третьей категории, при которой воздействие поражающих факторов взрыва на емкости с ЖРО привело к появлению пробоины в стенке емкости. Задача, которая стоит перед исследователем — определить минимальную толщину стенки преграды из определенного материала, при которой возможно нарушение целостности емкости при заданной скорости и конфигурации осколка. Для этого необходимо исследовать механизм пробития преграды и построить модель пробивного действия осколков при взрыве газовых баллонов.

Механизм пробития преграды подробно описан в [233] и зависит от многих факторов, среди которых определяющими являются «скорость осколка на подлете к мишени и отношение толщины преграды s к характерному размеру осколка, к примеру, $d_0 = 2\ r_0$ (r_0 — радиус сферического осколка эквивалентной массы). Механизм деформации преграды в случае действия осколка-шарика показан на рисунке 5.1. При больших скоростях осколка и $d_0 > s$ мощная ударная волна, возникающая в преграде, достигает ее противоположной стороны и отражается от нее в виде волны разрежения.

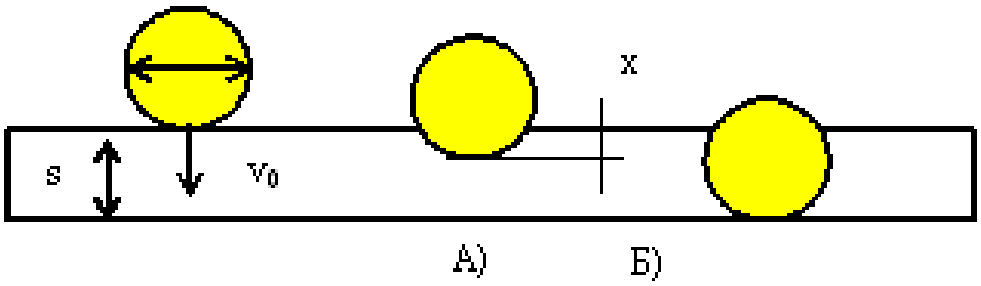

Рис. 5.1 - Механизм пробития преграды осколком-шариком на этапах: А — внедрения и Б — движения шарика с пробкой

При умеренных скоростях соударения осколка с металлической преградой (100—1300 м/с) и $s > r_0$ процесс соударения описывается моделью деформации некоторого объёма материала преграды, зависящего, естественно, от размеров (массы) осколка. Условно его можно разбить на два этапа. На первом этапе шарик, имея начальную скорость ν_0 внедряется в преграду, выбивает пробку и движется вместе с ней. Масса пробки в текущий момент времени $t > 0$ равна $\pi r^2 s \rho_м$. Материал пробки подвергается при этом деформациям сдвига, а действующая сила R_τ определяется касательным напряжением τ и изменяется линейно

$$R_\tau = 2\pi r s \tau \tag{5.1}$$

Эта сила действует к моменту внедрения шарика на глубину r_0 . В дальнейшем сила сопротивления преграды будет изменяться по закону

$$R_\tau = 2\pi r_0 (s + r_0 - x)\tau \tag{5.2}$$

в котором x -путь, пройденный центром массы осколка от момента его соударения с преградой. На втором этапе рассматривается движение системы «осколок — пробка» под действием силы (44), при этом путь центра массы осколка изменяется от r_0 до $r_0 + s$.

Из рассмотренного процесса соударения можно сделать вывод о том, что основная часть кинетической энергии осколка расходуется на деформацию материала преграды. В данной модели не учитываются потери энергии осколка на образование ударных волн в преграде. Воспроизведем ля нашей модели расчетные формулы [44], основанные на использовании

различных допущений. Одна из первых формул основывалась на допущении теории пластических деформаций о том, что удельная энергия деформации преграды E_1 не зависит ни от массы, ни от формы ударяющего тела, ни от толщины преграды и определяется только прочностными характеристиками материала преграды, которые в свою очередь пропорциональны величине разрушающих касательных напряжений материала τ . Сказанное позволяет записать следующее соотношение для заданного материала:

$$E_1 = \frac{E}{V} = \alpha k \tau = const \tag{5.3}$$

где E — энергия, затраченная на деформацию материала преграды;

V — объём деформированного материала; k – коэффициент динамичности, учитывающий упрочнение материала при динамическом характере сдвиговых деформаций;

α — согласующий коэффициент.

В случае если предположить, что вся кинетическая энергия осколка, имеющего массу m и скорость ν , расходуется на деформацию материала, объём которого равен объёму Ss выбитой пробки, то фактическая удельная энергия, то есть энергия, приходящаяся на единицу объёма разрушаемой преграды, в данном случае будет равна $\frac{mv^2}{2Ss}$ а условие пробития преграды будет определяться соотношением

$$\frac{mv^2}{2Ss} \geq E_1 \tag{5.4}$$

В этом выражении площадь соударения S осколка с преградой-мишенью является случайной величиной» [233]. Также случайной величиной является глубина проникновения осколка в материал x толщиной s. В момент пробития $x=s$. Введем в рассмотрение безразмерную величину

$$D = \frac{x}{\bar{\bar{x}}} \tag{5.5}$$

Где $\overline{x}$ - средняя глубина пробития осколка, и используя обозначение

$$E_s = \frac{mv^2}{2\bar{\bar{S}}s} \tag{5.6}$$

вместо (5.5) можно записать

$$D \leq \frac{E_s}{E_1} \tag{5.7}$$

Интегральная функция распределения *F(D)* этой случайной величины схематично представлена на рис. 5.2. В данном случае, исходя из определения, функция распределения *F(D)* есть ни что иное, как вероятность того, что случайная величина *D*, вызывающая у объекта заданный эффект воздействия, будет меньше некоторой величины. Для нашей задачи с учетом условия пробития преграды (5.4), замечания о случайности величин x, а следовательно, и *D*, а также обозначения (5.5) вероятность пробития преграды осколком $p_П$ можно определить как условную вероятность того, что случайная величина *D* примет значение, не превосходящее D_1, то есть

$$p_П = p(D \leq D) = F(D_1) = P_n,$$

Где $F(D_1)$ — функция распределения случайной величины *D*.

Согласно определению функция $F(D_1)$ представляет собой интегральный закон распределения относительных величин пробоин *D*, сделанных осколком. Поэтому, с вероятностью $P=F(D_1)$ у объекта проявятся эффекты не ниже заданного (не ниже заданной силы) [50].

Конкретный вид зависимости $F(D_1)$для заданных параметров осколка и материала преграды определяется путем проведения натурного эксперимента.

Можно, к примеру, произвести достаточно большое число стрельб и определить статистическую вероятность пробития данной преграды осколками известной массы и формы при постоянном значении скорости соударения как отношение числа случаев пробития преграды к общему числу выстрелов.

Проводя опыты для других условий разлета осколков, определяющих значение параметра D можно построить функцию $F(D_1)$ по нескольким точкам. Примерный вид этой зависимости приведен на рисунке 5.2.

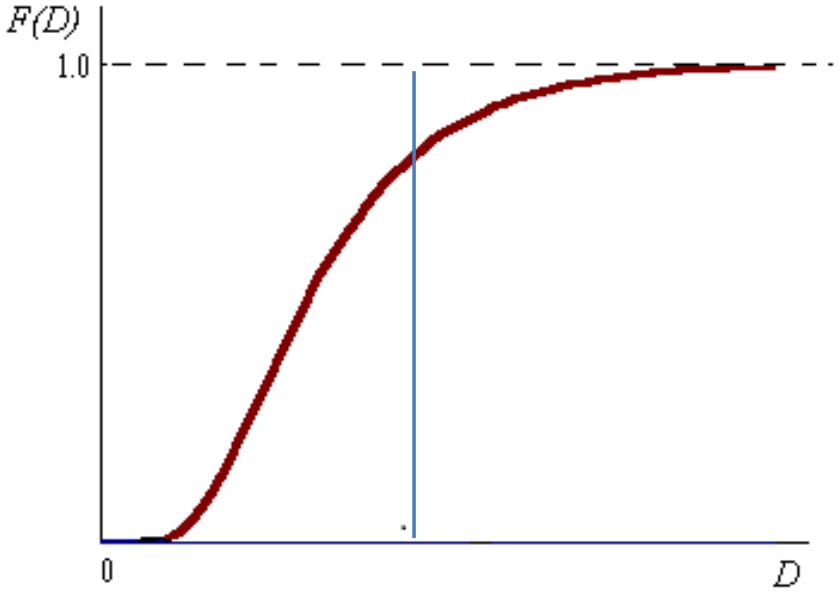

Рис. 5.2 - Закон распределения относительных величин пробоин

В рамках исследования произведены опыты, суть которых состоит в стрельбе одинаковыми осколками по специальной преграде, определении относительных глубин пробоин в них и построении статических зависимостей $F(D_1)$.

Имея зависимость $F(D_1)$, легко найти аналогичную зависимость $F(E_s)$, полагая при этом $E_s = DE_1$ и зная значение удельной энергии деформации материала преграды E_1. Примерный вид зависимостей $F(E_s)$ для осколков одинаковой массы, но различной формы приведен на рисунке 5.3. Видно, что для осколков более компактных форм диапазон изменения аргумента E_{min} до E_{max} уменьшается, превращаясь в точку E_s , при этом сама зависимость $F(E_s)$ превращается в ступенчатую функцию. В этом случае функция $F(E_s)=1$ при D =1.

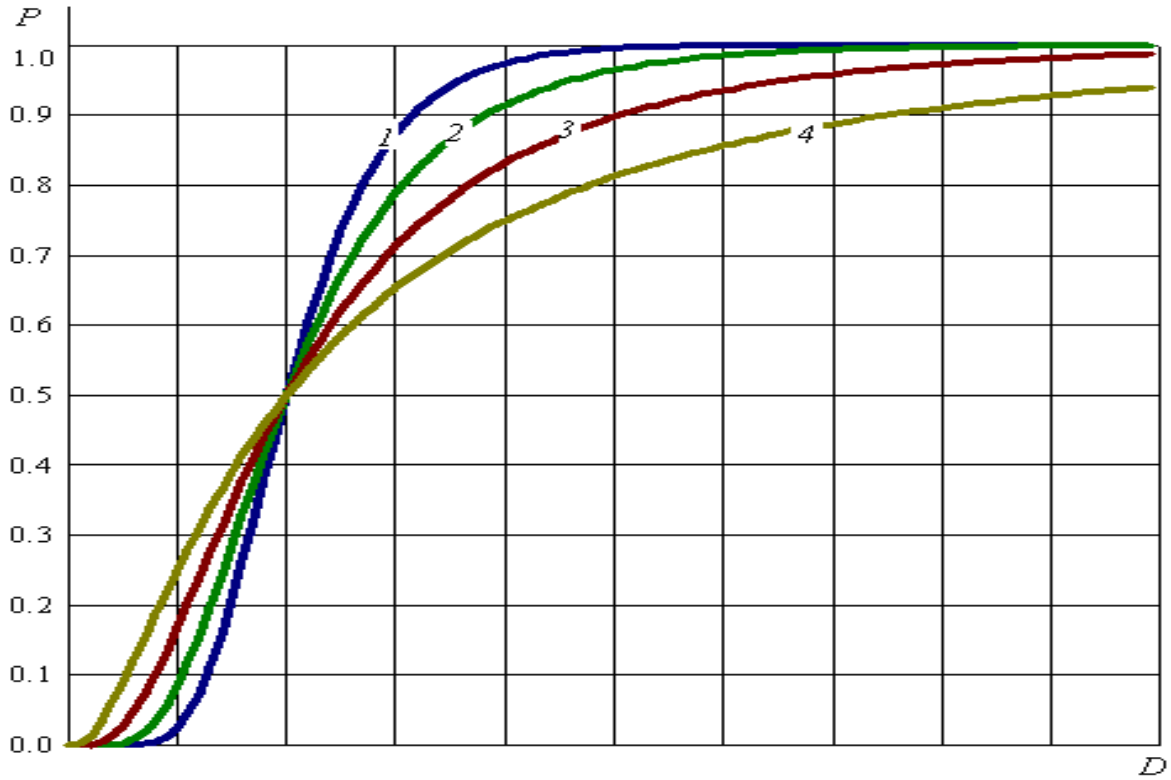

Рис. 5.3 - Зависимость вероятности пробития преграды p_n от формы и удельной энергии осколка E_s

Все вышеизложенное дает возможность получить расчетную формулу для определения скорости осколка $v_{пр}$, при которой обеспечивается пробитие преграды толщиной s.

$$v_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{2E_1 s\Phi}{m^{1/3}}} \tag{5.8}$$

или предельную толщину $s_{\text{пр}}$ преграды, пробиваемую осколком заданной массы m , скорости v, с учетом формы осколка Φ

$$s = \frac{m^{1/3}v^2}{2E_1\Phi} \tag{5.9}$$

Записав формулу (5.9) для преграды толщиной s_1 и $E_1 = \alpha k_1 \tau_1$ и другой преграды толщиной s' и $E_1 = \alpha k' \tau'$ взяв отношение правых и левых частей и разрешив относительно s', получим формулу

$$s' = s_1 \frac{k_1 \tau_1}{k' \tau'} \tag{5.10}$$

для нахождения так называемой эквивалентной толщины s'.

Таким образом, соотношение (5.10) показывает, что можно заменить преграду толщиной s_1 из данного материала эквивалентной по толщине s' преградой из некоторого другого материала, рассматриваемого в качестве эталонного. Чаще всего в качестве эталонного материала рассматривают дюралюминий и находят для любой другой преграды (например, стальной) так называемый дюралевый эквивалент, пользуясь зависимостью [44].

5.2 Разработка методики проведения баллистических испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной скорости встречи осколков разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины его внедрения в нее

5.2.1 Планирование эксперимента

Безопасность в чрезвычайных ситуациях в той или иной степени связана с измерениями, а для лиц, связанных с анализом и оценкой риска чрезвычайных ситуаций оценивание опасности и измерение величин поражающих факторов составляют основное содержание их работы.

В ходе исследования рассмотрены некоторые основные понятия теории вероятностей и математической статистики, широко используемые в теории измерений, такие как случайная величина, генеральная совокупность и выборка, результат измерения, доверительный интервал.

Пусть некоторая величина X в ряде испытаний может принимать различные числовые значения. Если значение величины X в каждом данном испытании не может быть указано заранее (непредсказуемо), то величина X называется случайной величиной. Если случайная величина может принимать бесконечное множество значений, причем эти значения могут

быть сколь угодно близки друг к другу, то такая величина называется непрерывной случайной величиной. Если же случайная величина может принимать лишь дискретные значения, то она называется дискретной случайной величиной. Факт принятия величиной заранее заданного значения для дискретной случайной величины или попадания в заданный интервал для непрерывной случайной величины в конкретном испытании является случайным событием, происходящим с определенной вероятностью.

Известно, что охарактеризовать случайную величину можно при помощи закона ее распределения. Под законом распределения случайной величины понимается соответствие, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и вероятностями принятия этих значений. Это соответствие может быть задано в виде таблицы, графика или математической формулы. В основе любых измерений лежат прямые измерения, в ходе которых находят некоторое числовое значение физической величины. Каждая отдельная измерительная операция (отсчет, замер) называется наблюдением, а получаемое при этом значение физической величины – результатом наблюдения. В связи с тем, что результат отдельного наблюдения включает в себя неизвестные погрешности, для решения поставленной выше задачи нахождения оценки значения физической величины в процессе измерения проводят серию наблюдений. Получаемые в серии результаты наблюдений подвержены как систематическим, так и случайным отклонениям от истинного значения физической величины. Такие заранее непредсказуемые в каждом данном наблюдении результаты представляют собой случайную величину. Многократное повторное проведение опыта позволяет установить статистические закономерности, которым удовлетворяет данная случайная величина, и найти результат измерения.

Задачей эксперимента является нахождение истинного значения x_0 физической величины, которое может быть найдено, если имеется

генеральная совокупность всех значений искомой величины X. Однако, в связи с тем, что количество наблюдений в выборке конечно, в опыте находят некоторое приближенное к x_0 значение X , называемое оценкой истинного значения, и указывают интервал, в который истинное значение x_0 попадает с заданной вероятностью P. Этот интервал называют доверительным интервалом, а вероятность P — доверительной вероятностью. В качестве оценки истинного значения согласно выбирают среднее арифметическое результатов наблюдений в выборке, которое называют выборочным средним. Среднее x также является случайной величиной, и если повторить опыт по его нахождению несколько раз, то получим выборку средних X: x_1, x_2 , ..., x_k , которые также будут отличаться друг от друга случайным образом, однако разброс средних значений будет заметно меньше разброса результатов отдельных наблюдений в каждой выборке.

Эксперимент широко используется в современной научной деятельности и является единственным способом определения оценок параметров генеральной совокупности, если отсутствуют теоретические методы их оценки.

Планированием эксперимента называется процедура выбора числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Все факторы, формирующие процесс экспериментальных исследований изменяются одновременно по определенным зависимостям, а конечным результатом проведения многофакторного эксперимента будет математическая модель исследуемой функции.

Полный факторный эксперимент состоит из следующих частей:

сбор и анализ априорной информации; выбор входных и выходных переменных, области экспериментирования; выбор математической модели, с помощью которой будут представляться экспериментальные данные; выбор

критерия оптимальности и плана эксперимента; определение метода анализа данных;

проведение эксперимента; проверка статистических предпосылок для полученных экспериментальных данных; обработка результатов; интерпретации и рекомендаций.

На составляющих факторного эксперимента следует остановиться подробней.

Сбор и анализ априорной информации. На этом этапе исследователь проводит анализ научной литературы по направлению своих научных изысканий, готовит план будущих экспериментальных исследований.

Выбор входных и выходных переменных. Входные переменные (будем называть их факторами) определяют состояние объекта (функции). Основное требование к факторам — управляемость. Под управляемостью понимается установление нужного значения фактора (уровня) и поддержание его в течение всего опыта. В этом состоит особенность активного эксперимента. Факторы могут быть количественными и качественными. Примерами количественных факторов являются температура, давление, концентрация, скорость и т. п. Их уровням соответствует числовая шкала. По результатом эксперимента обычно составляется экспериментальный отчет.

Основные факторы, влияющие на вероятность нарушения целостности емкостей-цистерн с ЖРО в ходе реализации сценария радиационной запроектной аварии, инициированной пожаром в ЦПУ и взрывом газовых баллонов на палубе ПАТЭС [21]:

избыточное давление во фронте ударной волны;

скорость осколков;

температура;

прочность (толщина и материал) стенок.

Как представлено в работе [210] характер и степень повреждений, наносимых осколками, в значительной мере зависят от его скорости в момент

встречи с целью. «После разрыва боевой части осколочный поражающий элемент по мере дальнейшего движения по траектории теряет свою скорость из-за наличия силы трения о воздух. Поэтому, для оценки эффективности действия осколочных боеприпасов, разрывающихся на некотором расстоянии от цели, необходимо знать характеристики движения осколка на всей траектории его полета. Знание количественных характеристик поражающих факторов движения осколка в каждый момент времени позволит также определить и безопасные условия применения средства поражения» [210]. Особенно важно для правильного понимания механизма воздействия важно знать скорость осколка в момент встречи с преградой.

5.2.2 Краткое описание методики проведения эксперимента

Методика проведения эксперимента должна содержать следующие элементы:

назначение,

ограничения и допущения;

объект исследования;

расчетные соотношения;

состав участников: для нашего случая (ВШТБ СПбПУ (Туманов А.Ю.), ИЦ НПО «Спецматериалы»);

оборудование и аппаратура (рис. 5.4):

ПМУ — пневматическое метательное устройство осколков;

ИУС — измерительное устройство скорости осколков;

ПУ — приемное устройство;

УОИ1 — устройство обработки информации по формированию выборки x_i;

УОИ2 — устройство обработки информации по формированию выборки v_i;

УОИ3 — устройство обработки информации по определению вида ФЗВ методами математической статистики.

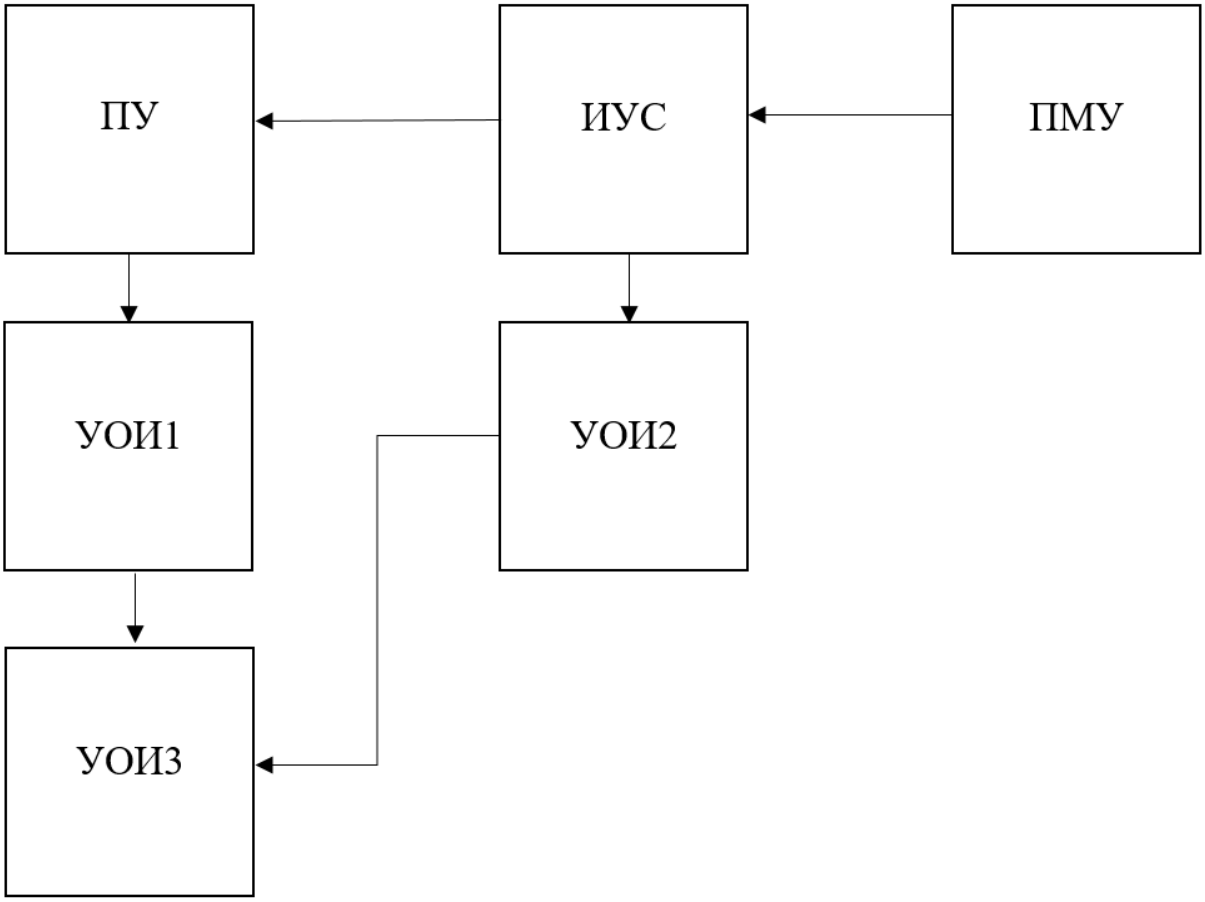

Рис. 5.4 - Принципиальная схема устройства для проведения испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной скорости встречи осколков разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины его внедрения в нее

В данном параграфе описывается полный алгоритм проведения экспериментальной сессии:

1. Порядок проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных и т.д.

2. Переменные;

Независимые переменные (факторы). В этом пункте приводятся названия всех НП, их тип (внутригрупповой или межгрупповой), а также количество уровней. Зависимые переменные. Указывается одна или несколько ЗП, которые измеряются в ходе эксперимента. Если в качестве ЗП используется производный показатель, который не измеряется непосредственно в ходе опыта, то оговаривается способ его вычисления (то есть он измеряется, но косвенным методом). Независимые переменные:

скорость осколка;

масса осколка;

математическое ожидание сечения миделя

глубина внедрения в данную преграду

3. Результаты;

В этом разделе приводятся количественные и качественные данные эксперимента без элементов интерпретации. Результаты заносятся протокол по форме представленной в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Форма результатов испытаний

Порядковый номер	Масса поражающего элемента, кг	Скорость поражающего элемента, м/с	Материал преграды	Деформация преграды, глубина, мм	Деформация преграды, диаметр миделя, мм
1	2	3	4	5	6

4. Обсуждение результатов;

В этом разделе приводятся количественные и качественные данные эксперимента в сравнении с теоретическими результатами.

5.2.3 Расчетно-экспериментальное исследование стойкости образцов

Рассмотрим воздействие осколков промышленных конструкций и оборудования на преграды из различных материалов. В ходе работы, на

основании примерной методики ИЦ НПО «Спецматериалы», ГОСТ Р5 0744, ГОСТ Р 51659-2000 автором для проведения испытаний в лаборатории «Техносферная безопасность» (Высшая школа техносферной безопасности СПбПУ Петра Великого» разработана и апробирована единая методика № 1/19 проведения баллистических испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной скорости встречи осколков разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины его внедрения в нее. Ниже приведены основные положения представленной методики.

1 Общие положения

1.1 Настоящая методика распространяется на порядок и условия проведения баллистических испытаний образцов из различных материалов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения глубины внедрения осколков разрушенных конструкций промышленного объекта в заданную преграду.

1.2 Целью баллистических испытаний образцов является определение по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной глубины внедрения осколков разрушенных конструкций промышленного объекта в заданную преграду, регламентированного требованиями ГОСТ Р5 0744, ГОСТ Р 51659-2000. На фиксированной скорости встречи V_1 необходимо провести до 50 испытаний и в каждом определить глубину внедрения поражающих элементов в преграду. После этого необходимо определить параметры закона распределения. Таких скоростей V_1 должно быть 4 – 5 и на каждой из них должен быть определен закон распределения случайной глубины внедрения.

1.3 Под противоосколочной стойкостью образцов понимается их способность противостоять внедрению или пробитию при воздействии поражающими элементами (пулями или осколками) из стрелкового оружия

на дистанции, установленной требованиями нормативно-технической документации (НТД).

1.4 Внедрением в преграду считается событие, при котором в результате воздействия образец не пробит насквозь, а поражающие элементы или осколки не вышли за тыльную сторону образца.

1.5 За показатель, характеризующий стойкость образца из материала, принимается расстояние в глубину (мм) образца под заданным углом попадания осколка заданной формы (90±5) от входного отверстия до места где остановился осколок.

1.6 Зачетным выстрелом, кроме случаев специально предусмотренных программой испытаний, считается выстрел, при котором:

место попаданий поражающих элементов должно быть на расстоянии не менее пяти калибров от предыдущего попадания (в случае регламентирования требованиями ГОСТ Р 50744 применения двух видов оружия) и от края образца;

заданный угол попадания пули должен составлять (90±5) градусов к поверхности образца;

скорость поражающих элементов должна соответствовать таблице 1 ГОСТ Р 50744.

1.7 Испытания проводятся испытательным центром специальных материалов и изделий (ИЦ СМИ), при этом, допускается участие в проводимых работах представителей лаборатории техносферной безопасности ВШТБ СПбПУ Петра Великого.

1.8 Образцы, направляемые на испытания, должны иметь маркировку — номер партии и номер образца, а также сопроводительные документы (Акт отбора образцов от партии, результаты замера твердости, и др.).

2 Условия и порядок проведения испытаний

2.1 Условия испытаний

2.1.1 Все испытания; проводятся при нормальных климатических условиях в соответствии с ГОСТ 15150:

— температура плюс (25 ± 10) °С;

— относительная влажность (45 — 80) %.

2.1.2 При проведений работ испытываемый образец и устройство метания осколков располагаются таким образом, чтобы обеспечить обстрел объекта по нормали с погрешностью не более 5 градусов и на требуемой дистанции в соответствии с НТД.

2.2 Порядок проведения испытаний

2.2.1 Устройство метания осколков размещают на стенде крепления оружия «Трасса».

2.2.2 Образец преграды закрепляется в ПУ (приспособлении из сухой сосновой древесины в виде параллелепипеда высотой (50 — 70) см и длиной сторон в основании (30 — 50) см). В качестве подложки используют листовой войлок по ГОСТ 6418 толщиной (20±3) мм.

2.2.3 Образец закрепляется при помощи струбцин, обеспечивая тем самым плотное прилегание образца к поверхности приспособления в предполагаемой точке воздействия осколка.

2.2.4 Для измерения скорости поражающих элементов за дульным срезом на расстоянии от него (в м, определенного НТД) устанавливается `регистратор скорости полета поражающих элементов РС—4М с погрешностью измерения скорости пули не более ±1,0 %. Работоспособность и готовность к измерению проверяют в порядке, изложением в руководстве по эксплуатации регистратора скорости РС-4М.

2.2.5 На испытываемом образце отмечают точку прицеливания и наводят оружие с помощью диоптрического прицела, обеспечивая при этом угол попадания поражающих элементов (90 ± 5) градусов к поверхности элемента образца.

2.2.6 Далее в предполагаемую точку воздействия производят выстрел. На каждом выстреле измеряют скорость осколка, а результат воздействия на образец` фиксируют. Глубина внедрения измеряется электронным прибором-глубиномером в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора.

2.2.7 Обстрел испытываемого образца производят в объеме до 50 выстрелов. В случае регламентирования требованиями ГОСТ Р 50744 применения двух видов оружия обстрел производят в объеме до 50 выстрелов из каждого оружия.

2.2.8 Оценка поражения осуществляется в соответствии с п.п. 1.3—1.6 настоящей Методики.

2.2.9 Результаты испытаний оформляют протоколом по форме, изложенной в Руководстве по качеству (см табл. 5.1).

3 Материально-техническое и метрологическое обеспечение испытаний

3.1 Оружие и боеприпасы в соответствии с таблицей 1 ГОСТ Р 50744.

3.2 Стенд «Трасса».

3.3 Регистратор скорости полета пули РС-4М с погрешностью измерения скорости пули не более: 1,0 %. Номер в ГРСИ РФ: 43885-10. Производитель МГП "Нанотех", г. Санкт-Петербург.

3.4 Гигрометр психрометрический ВИТ-1.

3.5 Линейка металлическая.

3.6 Рулетка металлическая.

3.7. Глубиномер электронный.

4 Требования безопасности

При проведении испытаний необходимо руководствоваться действующими на рабочих местах инструкциями по технике безопасности проведения работ, разработанными в соответствии с требованиями стандартов и с учетом специфики проводимых испытаний.

5 Требования к квалификации испытателей

К испытаниям допускаются лица, обученные обращению с: баллистическими системами, боеприпасами к ним, измерительными системами, прошедшие инструктаж по охране труда, полный курс обучения, проверку на подготовленность и сдавшие зачет комиссии.

5.3 Статистическая проверка ФЗВ

В работе были проведены ряд испытаний и оформлены протоколы испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной скорости встречи осколков разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины внедрения в нее (табл. 5.2).

Таблица 5.2 - Форма протоколов испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной скорости встречи осколков разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины внедрения в нее

Serial number	Submunition weight, m, g	Submunition speed, v, m/s	Material barriers	Deformation constraints, depth, x, mm	Deformation of the obstacles, the diameter of the midsection, mm
1	0.49	143	dural	x_1	S_1
2	0.49	152	dural	x_2	S_2
3	0.49	148	dural	x_3	S_3
….					
30	0.49	145	dural	x_{30}	S_{30}
1	0.49	147	Sculptural clay	x_4	S_1
2	0.49	143	Sculptural clay	x_5	S_2
3	0.49	145	Sculptural clay	x_6	S_3
…					
30	0.49	147	Sculptural clay	x_{30}	S_{30}
1	0.49	144	Pine Board	x_7	S_1
2	0.49	150	Pine Board	x_8	S_2
3	0.49	143	Pine Board	x_9	S_3
…					
30	0.49	148	Pine Board	x_{30}	S_{30}

Из протоколов испытаний, представленных в приложении В перенесем данные по глубинам внедрения осколков x_i и их скоростям v_i при подлете к преграде.

Рассчитаем по выборке 1 приложения В точечные оценки математического ожидания и среднего квадратичного отклонения. В табл. 5.3 представлен общий вид дискретного вариационного ряда.

Таблица 5.3 - Общий вид дискретного вариационного ряда

Варианты, x_i	x_1	x_2	…	x_k
Частоты, n_i	n_1	n_2	…	n_k

В таблице 5.4 приведены данные вариант, полученных в результате баллистических испытаний. Сведем их в вариационный ряд в возрастающем порядке с указанием числа наблюдений. Построим статистическое распределение выборки x_i – глубины внедрения осколков в заданную преграду.

Таблица 5.4 - Фрагмент дискретного вариационного ряда внедрения в преграду полученных в результате испытаний преграды

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Варианты, x_i, мм	3,6	3.71	3.96	4.36	4.5	4.53	4.59	4.65	4.85
№ п/п	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Варианты, x_i	4.92	4.96	5.26	5.38	5.44	5.48	5.81	5.97	6.24
№ п/п	19	20	21	22	23	24	25	…	27
Варианты, x_i	6.25	6.37	6.62	6.9	7.07	7.87	7.93	…	8.8

Построим статистическое распределение выборки v_i.

Для этого вычисляют размах варьирования R признака X, как разность между наибольшим и наименьшими значениями признака.

$$R = x_{max} - x_{min} \tag{5.11}$$

В нашем случае R= 8,8 – 3,6 = 6,2

Так как в нашем распоряжении имеются данные выборки значения количественного признака полученные в результате примерно 30 наблюдений, то необходимо оценить (приближенно найти) математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение, так как эти два параметра полностью определяет нормальное распределение.

Размах R варьирования признака X делится на k равных частей и таким образом определяется число столбцов (интервалов) в таблице. Число k частичных интервалов выбирают, пользуясь одним из следующих правил:

1) $k \approx \sqrt{n}$

или

2) $k \approx 1 + 3.221 \cdot ln(n)$ - формула Стерджеса.

К ≈ 5.47≈ 6

Длина Δ каждого частичного интервала определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{R}{k} \tag{5.12}$$

Получаем Δ≈1.03333, округляем до Δ=1.03, что соответствует количеству знаков после запятой у x_i

В таблице 5.5 приведен общий вид интервального вариационного ряда, с возможностью перехода к дискретному виду. За начало первого интервала возьмем x_{min}, за конец x_{max}

Таблица 5.5 - Общий вид интервального вариационного ряда, с возможностью перехода к дискретному виду

Интервалы-варианты $(x_{i-1}; x_i)$	$(x_0 ; x_1)$	$(x_1; x_2)$	…	$(x_{k-1}; x_k)$
Частоты n_i	n_1	n_2	…	n_k
Середины интервалов $(x_{i-1}; x_i)$	x^{*1}	x^{*2}	…	x^{*n}
Относительные частоты $h_i = n_i\, n$	h_1	h_2	…	h_n

В таблице 5.6 представлены данные для перехода к кумулятивной кривой и эмпирической функции распределения.

Таблица 5.6 - Расчетная таблица для перехода к кумулятивной кривой и эмпирической функции распределения

	1	2	3	4	5	6
Интервалы - варианты, $(x_{i-1}; x_i)$,	3.6–4.63	4.63–5.66	5.66–6.69	6.69–7.72	7.72–8.75	8.75-8.8
Частоты n_i	7	8	6	2	2	1
Середины интервалов	4,115	5,145	6,175	7,205	8,235	8,775
Относительные частоты w_i	0.2692	0.3077	0.2307	0.0769	0.0769	0.0384
Накопленные частоты	0.2692	0,5769	0,8076	0,8845	0,9614	1

На рис. 5.5 для наглядности представим различные графики статистического распределения – гистограмму для первой выборки. График построен при помощи пакета прикладных программ средства Microsoft Office.

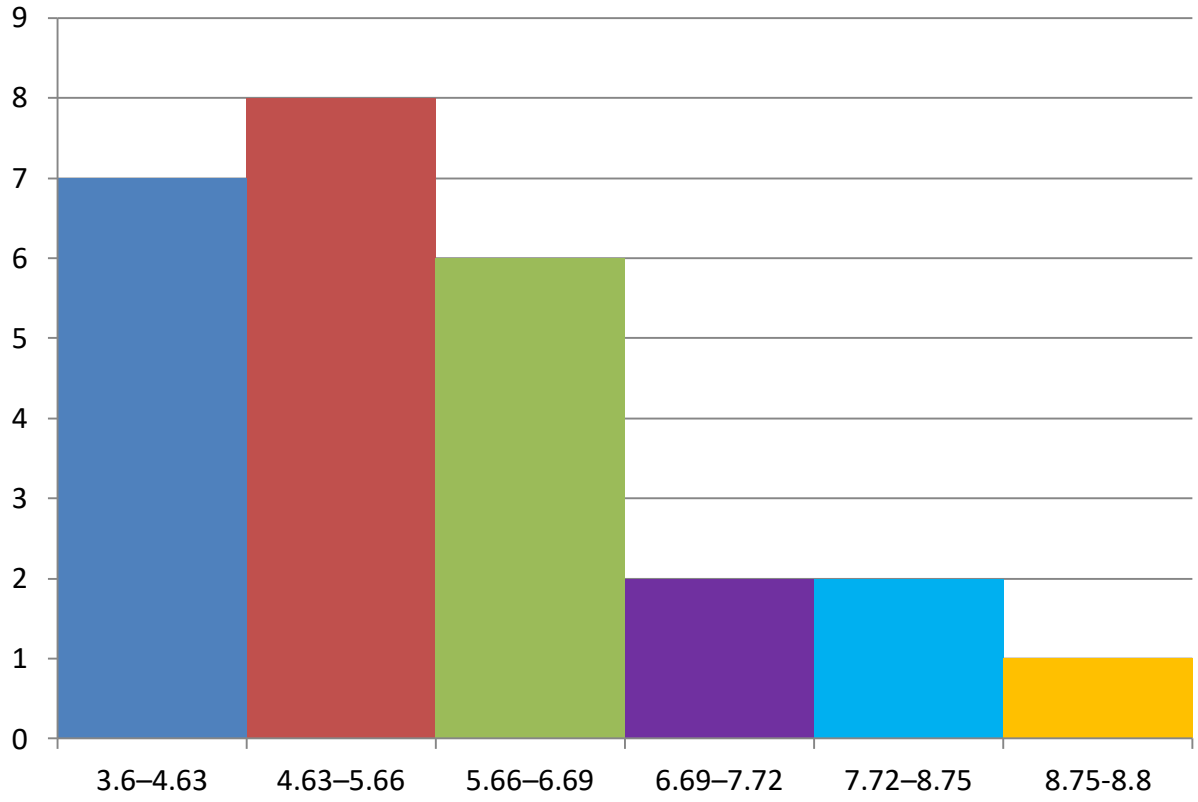

Рис. 5. 5 - График статистического распределения. Гистограмма для первой выборки

Как известно, эмпирическая функция распределения (ЭФР) выборки служит для оценки теоретической функции распределения генеральной совокупности.

Построим ЭФР по данному распределению выборки. Решение. По определению ЭФР,

$$F^*(x) = \frac{n_x}{n} \tag{5.13}$$

Где n_x – число вариант (середин интервалов), меньших x; n – объем выборки

Данные для построения возьмем из таблицы. Искомая эмпирическая функция:

$$F^*(x) = \begin{cases} 0, \text{при } x \le 4{,}115 \\ 0.2692, & 4{,}115 \le x \le 5{,}145 \\ 0.5769, & 5{,}145 \le x \le 6{,}175 \\ 0.8076, & 6{,}175 \le x \le 7{,}205 \\ 0.8845, & 7{,}205 \le x \le 8{,}235 \\ 0.9614, & 8{,}235 \le x \le 8{,}775 \\ 1, & x > 8{,}775 \end{cases}$$

На рис.5.6 представлен полигон относительных частот и теоретическая плотность вероятности глубины внедрения осколков для выборки 1 (приложение В).

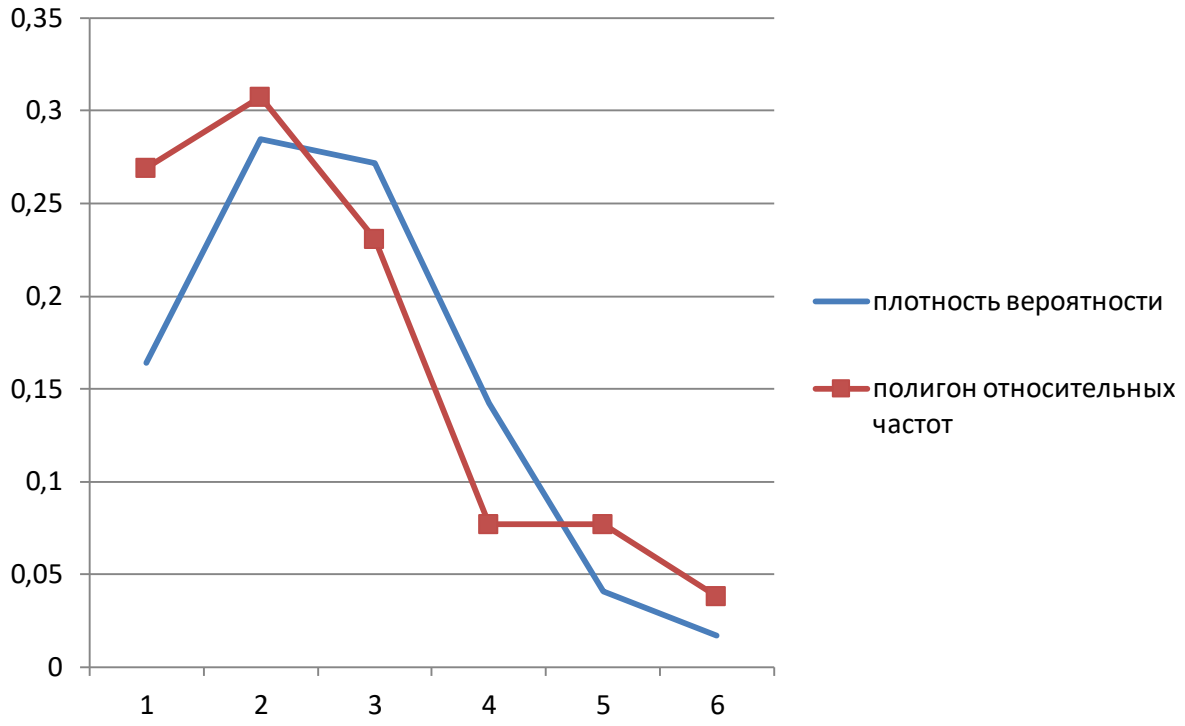

Рис. 5.6 - Полигон относительных частот и теоретическая плотность вероятности глубины внедрения осколков для выборки 1

Перечислим применяемые на практике формулы для вычисления средних значений по массиву данных (выборке) объёмом n. Наиболее употребительным средним является арифметическое среднее:

$$x_a = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \tag{5.14}$$

Данные для расчета взяты из таблицы 1

$x_a = \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = 5{,}58$

Арифметическое среднее является наиболее часто встречающейся оценкой математического ожидания.

$$M(x) = \bar{x}$$

Это характерно как для генеральной совокупности, так и для выборки.

Выборочная дисперсия. Формула дисперсии:

$$D = \bar{x}^2 - [\bar{x}]^2 \tag{5.15}$$

Найдем ее для нашей выборки 1.

$$D = 1{,}76$$

Выборочное среднеквадратичное отклонение (стандарт) определяется как квадратный корень из выборочной дисперсии.

$$\sigma_{b=\sqrt{D_b}} \tag{5.16}$$

$$\sigma_b = 1{,}33$$

Доверительный интервал — статистическая оценка параметра исследуемого вероятностного распределения, имеющая вид интервала, границами которого служат функции от результатов наблюдений и доверительной вероятности, который с вероятностью P "накрывает" неизвестное значение параметра. Так как математическое ожидание вычислить невозможно, его возможно только оценить, то при нахождении оценки математического ожидания, следует указывать доверительный интервал с соответствующей доверительной вероятностью. Доверительная вероятность P - вероятность достоверности принимаемой гипотезы, характеристика надёжности, полученной по выборке оценки того или иного параметра. Сопутствующим параметром доверительной вероятности P является уровень значимости α–вероятность допущения ошибок, т.е.

$\alpha = 1 - P$. Зададимся уровнем доверительной вероятности 95%, α=0,05.

$$\delta = \frac{t\sigma}{\sqrt{n}} \tag{5.17}$$

Рассчитаем доверительные интервалы δ Параметр распределения Стьюдента зависит от n размера выборки. Воспользуемся таблицами из приложения 1.

$$\bar{x} - \partial \leq M \leq \bar{x} + \partial$$

t = 2,06 , σ = 1,33, среднее арифметическое равно 5,58 Таким образом можно записать:

$$\bar{x} \mp \frac{t\sigma}{\sqrt{n}} = 5{,}58 \mp 2{,}06 * \frac{1{,}33}{\sqrt{27}} = 5{,}58 \mp 0{,}52$$

Рассмотрим другие характеристики вариационного ряда.

Вычисление моды для дискретного и интервального вариационного ряда. Модой называют варианту, которая имеет наибольшую частоту. Для дискретного вариационного ряда модой является 4,65, так как имеет наибольшую частоту.

Для интервального вариационного ряда определим интервал, которому соответствует наибольшая частота. Второму интервалу (4,63-5,66) соответствует наибольшая частота $n_2=8$, тогда по формуле вычисляется мода

$$\mathrm{M}_0 = x_{k-1+} \frac{\Delta(n_k - n_{k-1})}{2n_k - n_{k-1} - n_{k+1}} \quad (5.18)$$

Получим 4,63 + 1,03(8-7) / 2 · 5,66 - 4.65 - 6 = 6,17

Медианой m_0 называют варианту, которая делит вариационный ряд на две части по числу вариант. Если число вариант нечетно, то есть $n=2k+1$, $m_0=x_{k+1}$, при четном $n=2k$ медиана $m_0=(x_k+x_{k+1}) / 2$.

Вычислим коэффициент вариации по формуле:

$$V_x = \frac{\sigma_x}{M_x} \quad (5.19)$$

Полученный коэффициент вариации характеризует относительную ошибку эксперимента. Его можно выразить в процентах – 22,6%.

Закон распределения глубин внедрения осколков в преграду

Одной из основных задач при определении расчетных характеристик воздействия поражающих факторов источников ЧС является выбор

аналитического выражения для аппроксимации закона распределения исследуемой величины. Выбор считается обоснованным, если имеет место хорошее соответствие эмпирической и аналитической кривых. Если такой анализ производится визуально, это вносит элемент субъективизма. Более объективно решить поставленную задачу можно, используя критерии согласия. При этом реализуется схема, аналогичная той, которая применяется при проверке гипотез об однородности рядов: выдвигаются нулевая и альтернативная гипотезы; назначается уровень значимости; вычисляется эмпирическое значение тестовой статистики; по результатам расчетов принимается решение. Воспользуемся методикой, изложенной в [235]. В данном случае в качестве нулевой принимается гипотеза о соответствии (согласии) аналитической и эмпирической функций распределения, а в качестве альтернативной – их несоответствие. Степень согласия оценивается с помощью специальных статистик. Различные критерии (тесты) используют для оценки степени согласия разные статистики. В научной практике наиболее часто применяются критерий χ^2 (Пирсона), критерий Колмогорова, критерий $n\omega^2$ (Крамера - Мизеса - Смирнова), критерий Фишера.

Модифицированный Критерий $\chi 2$ (Пирсона) в настоящее время является наиболее распространенным критерием согласия. Для его применения область допустимых значений исследуемой СВ X разбивается на η интервалов. Число интервалов можно приблизительно определить по формуле в зависимости от длины n имеющейся выборки: $\eta \approx 5 \cdot \lg n$.

«При назначении границ интервалов наиболее удобно использовать следующую схему:

1. Выбрать аналитическую кривую для аппроксимации закона распределения исследуемой случайной величины.

2. Оценить по имеющейся выборке параметры распределения.

3. Построить аналитическую кривую обеспеченностей.

4. Разбить ось обеспеченностей на η равных интервалов.

5. Используя аналитическую кривую, определить границы интервалов для СВ *X* в зависимости от границ интервалов на оси обеспеченностей» [235]. Например, если η = 7, то границы интервалов на оси обеспеченностей будут соответствовать значениям 0, 17, 34, 51, 68, 85, 100 %; а ось *X* разобьется на интервалы. При реализации данной схемы модифицированного критерия Пирсона интервалы по оси X не будут равновеликими, но зато вероятность попадания значения СВ X в любой интервал будет одинаковой p = 1/η.

Одинаковым будет и теоретическое число случаев попадания значения случайной величины X в каждый интервал m=n/η (n – длина выборки).

В качестве меры расхождения между эмпирическими данными и аналитической функцией распределения используется тестовая статистика

$$(\chi^2)^* = n\sum_{j=1}^{\eta}\frac{\left(p_j{}^* - p_j\right)^2}{p_j} \qquad (5.20)$$

где и p_j – соответственно, эмпирическая и теоретическая вероятности попадания значения СВ в j-й интервал; n – длина выборки; η – число интервалов. p_j*

К. Пирсон показал, что закон распределения данной статистики не зависит от вида исходного распределения и при достаточно большом n хорошо аппроксимируется распределением χ2 с числом степеней свободы ν = η – θ – 1, где θ – число параметров распределения, определяемых по эмпирическим данным. Из выражения $(\chi^2)^*$ видно, чем больше расхождение между эмпирической и аналитической кривыми, тем больше значение статистики χ2. Поэтому при использовании критерия Пирсона назначают односторонний уровень значимости (обычно α = 5% или α = 10 %). Гипотеза о согласии эмпирической и аналитической кривых обеспеченности не опровергается, если эмпирическое значение статистики по формуле (5.20) не превышает теоретическое значение χ^2, соответствующее принятому уровню значимости α, т.е. если $(\chi^2)^* \leq \chi^2_{1-\alpha}$.

Критерий χ^2 может быть применен при выяснении вопроса о лучшем соответствии одной из нескольких аналитических кривых распределения одному и тому же эмпирическому ряду. При этом меньшее значение χ^2 будет свидетельствовать о лучшем соответствии данной функции распределения эмпирическим данным.

Следует подчеркнуть, что использование критерия Пирсона для выборок небольшого объема может приводить к неправильным выводам, а ряды наблюдений за характеристиками обычно не превышают нескольких десятков. Это накладывает определенные ограничения на использование данного критерия. Принято считать, что критерий согласия χ^2 допустимо применять при $n>50$. При этом требуется, чтобы число разрядов (интервалов) было равно 7-12 и в каждом разряде было не менее 5 элементов. Затруднительно априорно оценить, какая из моделей адекватно описывает поражающее действие осколков как случайную величину.

Проверка гипотезы о законе распределения

Предложено оценивать пригодность законов распределения с помощью результатов экспериментальных исследований (табл. 5.7). Рассмотрим три гипотезы о форме распределения.

Гипотеза 1: Глубина внедрения осколков в преграду подчиняется нормальному закону распределения с плотностью вероятности (см гл.4). Точечные оценки параметров генеральной совокупности были рассчитаны по выборке 5 (приложение 3) и табл. 5.7: $\overline{X}$ = 16,672 мм; $\sigma\overline{x}$= 1,408. Для проверки гипотезы 1 был использован модифицированный критерий Пирсона с 7-ю интервалами; Для применения модифицированного критерия согласия Пирсона разбиваем весь диапазон расходов на 7 интервалов так, чтобы по теоретическому распределению в каждый попало по 6-7 измерений. Обозначим матрицу-столбец указанных частот *Nt*.

Таблица 5.7 - Пример результатов экспериментального исследования глубин внедрения в преграду, полученных в результате баллистических испытаний при скорости осколка v=180 м/с

№ пп	Глубина внедрения, x, mm	№ пп	Глубина внедрения, x, mm	№ пп	Глубина внедрения, x, mm	№ пп	Глубина внедрения, x, mm
1	15,04	16	19,00	31	16,23	46	18,13
2	15,49	17	17,07	32	14,96	47	17,48
3	15,80	18	15,63	33	16,66	48	15,76
4	14,66	19	17,51	34	18,34	49	16,77
5	14,86	20	17,21	35	16,64	50	16,61
6	13,50	21	16,61	36	15,76	51	15,58
7	16,60	22	16,38	37	15,73	52	
8	17,72	23	16,89	38	15,81	53	
9	14,24	24	17,35	39	14,65	54	
10	18,65	25	17,93	40	16,74	55	
11	17,32	26	17,55	41	16,89	56	
12	19,20	27	16,63	42	16,57	57	
13	17,37	28	16,94	43	17,33	58	
14	20,16	29	15,82	44	18,36	59	
15	18,46	30	13,61	45	18,06	60	

Границы интервалов были найдены по заданным значениям теоретических частот попаданий в интервалы (табл. 5.8).

Таблица 5.8 - Расчетная таблица для перехода к кумулятивной кривой и эмпирической функции распределения по выборке 5

	1	2	4	4	5	6	7
Интервалы - варианты, $(x_{i-1};x_{i})$,	13,5-15,00	15,00-15,77	15,77-16,62	16,62-16,90	16,90-17,36	17,36-18,05	18,05-20,16
Частоты n_i	7	7	9	7	6	7	9
Середины интервалов	14,25	15,385	16,195	16,76	17,13	17,705	19,105
Относительные частоты w_i	0,1372	0,1372	0,17647	0,1372	0,11764	0,1372	0,1765

В таблице 5.9 представлены результаты расчета статистики Пирсона χ2

Таблица 5.9 - Результаты расчета статистики Пирсона χ2

№ интервала	Теоретическая частота, n_{tj}	Границы интервала	Эмпирическая частота, n_{ej}	$(n_{tj} - n_{ej})^2 / n_{tj}$
1.	7	13,5-15,00	7	0
2.	7	15,00-15,77	7	0
3.	7	15,77-16,62	9	0,571
4.	8	16,62-16,90	7	0.125
5.	8	16,90-17,36	6	0,5
6.	7	17,36-18,05	7	0
7.	7	18,05- 20,16	9	0,571
∑	51		51	1,767

На рис. 5.7 представлена теоретическая плотность вероятности для нормального распределения по данным выборки и полигон частот. Очевидно, что визуально трудно априорно определить вид распределения.

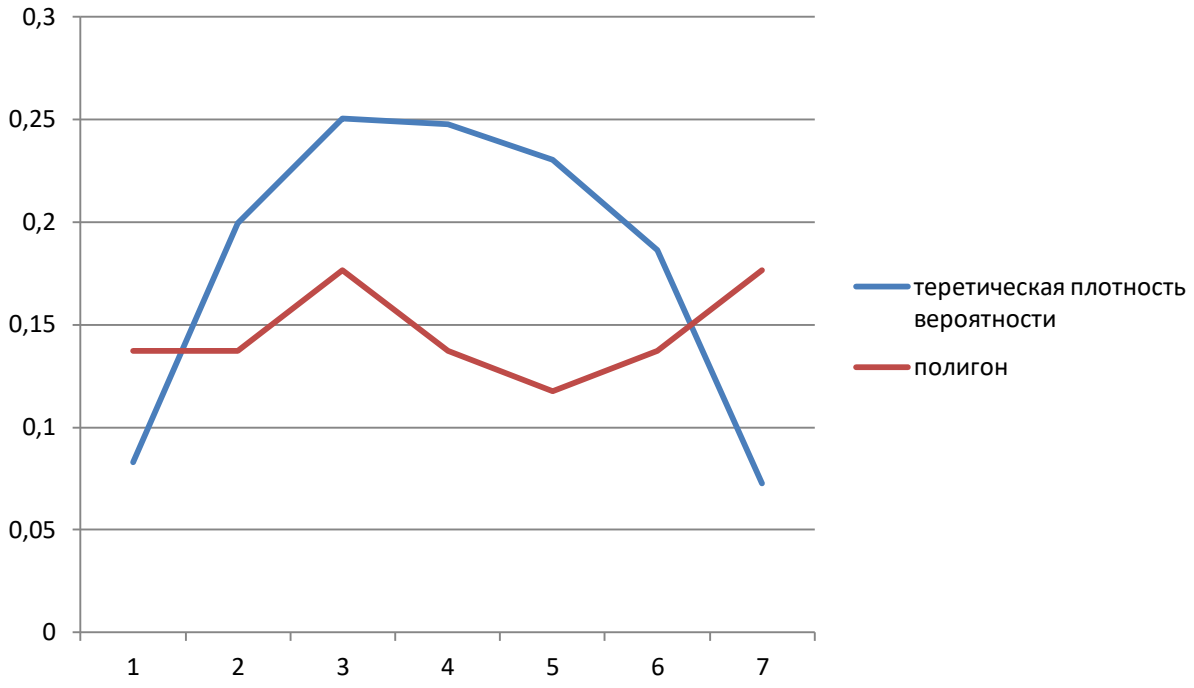

Рис. 5.7 - Теоретическая плотность вероятности для нормального распределения и полигон частот по данным выборки 5

$$(\chi^2) \quad = \sum_{i=1}^{7} \frac{(n_{tj} \quad - n_{ej})^2}{n_{tj}} = \quad 1{,}767 \qquad (5.21)$$

Квантиль нормального распределения может быть рассчитан по формуле, представленной в [235]:

$$u(\alpha) = 4{,}91 \cdot [(1-\alpha)^{0{,}14} - \alpha^{0{,}14}] \quad (5.22)$$

где α – уровень значимости.

$u(0{,}02) = 4{,}91 \cdot [(1-0{,}02)^{0{,}14} - 0{,}02^{0{,}14}] = 2{,}01$

$u(0{,}05) = 4{,}91 \cdot [(1-0{,}05)^{0{,}14} - 0{,}05^{0{,}14}] = 1{,}647$

$u(0{,}1) = 4{,}91 \cdot [(1-0{,}1)^{0{,}14} - 0{,}1^{0{,}14}] = 1{,}279$

Критическое значение статистики Пирсона может быть рассчитано по формуле Вилсона-Хилферти [235]:

$$\chi^2{}_{\text{кр}} = f_c \cdot \left[1 - \frac{2}{9 \cdot f_c} + u(\alpha) \cdot \sqrt{\frac{2}{9 \cdot f_c}}\right]^3, \; f_c = N - J - 1 \quad (5.23)$$

где N = 7 – количество интервалов, J = 2 – количество числовых характеристик закона распределения, оцениваемых по выборке, fc = 4 – число степеней свободы.

По формулам (5.22)-(5.23) получаем:

$\chi^2{}_{\text{кр}}$ (0,02) =11,40 ; $\chi^2{}_{\text{кр}}$ (0,05) =9,45 ; $\chi^2{}_{\text{кр}}$ (0,1) = 7,73.

При всех указанных уровнях значимости $\chi^2 < \chi^2{}_{\text{кр}}$. Следовательно, гипотеза 1 не отвергается.

Гипотеза 2: Глубина внедрения осколков в преграду подчиняется логнормальному закону распределения. Точечные оценки параметров генеральной совокупности были рассчитаны по выборке 5 (приложение В):

$\overline{X}$ = 16,672 мм; $\sigma\overline{x}$= 1,408. Обозначим матрицу-столбец указанных частот *Nt*. Границы интервалов были найдены по заданным значениям теоретических частот попаданий в интервалы. На рис. 5.8 представлена теоретическая плотность вероятности для нормального распределения по данным выборки и полигон частот. Визуально трудно априорно определить вид распределения.

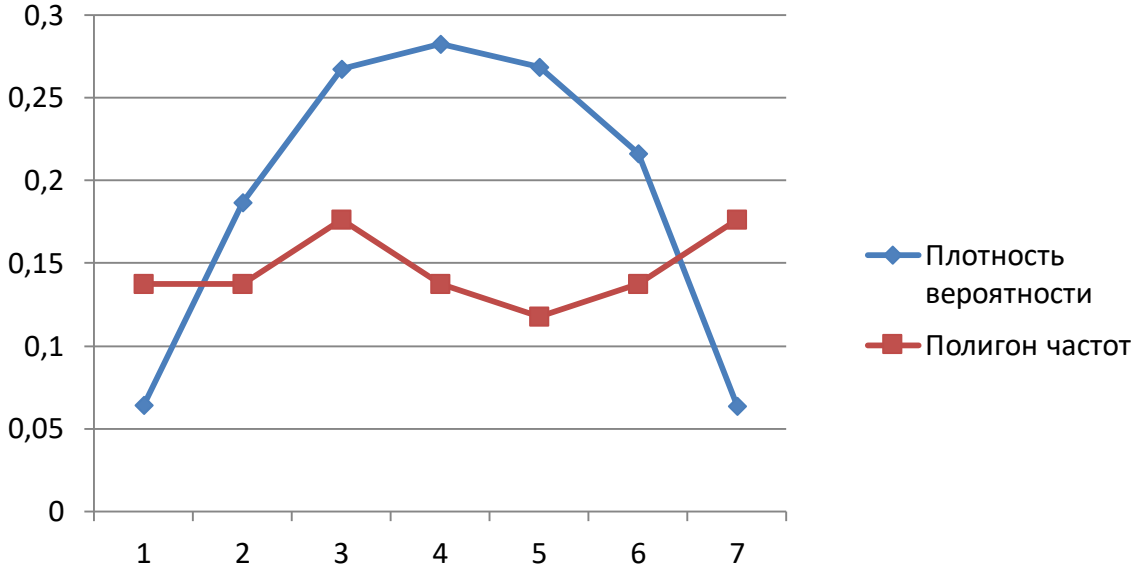

Рис. 5.8 - Теоретическая плотность вероятности для логнормального распределения и полигон частот по данным выборки 5

Результаты расчетов представлены в табл. 5.10.

Таблица 5.10 - Результаты расчета статистики Пирсона χ2

№ интервала	Середины интервалов	Плотность вероятности f_n	Границы Интервалов	Эмпирическая Частота, n_{ej}	Эмпирические относительные частоты	$p_j{}^* - p_j$	$\frac{(p_j{}^* - p_j)}{p_j}$
1.	14,25	0,08309	13,5-15,00	7	0,13725	- 0,05410	0,03522
2.	15,385	0,19957	15,00-15,77	7	0,13725	0,06231	0,00219
3.	16,195	0,25027	15,77-16,62	9	0,17647	0,0738	0,02176
4.	16,76	0,24782	16,62-16,90	7	0,13725	0,11057	0,04933
5.	17,13	0,23026	16,90-17,36	6	0,11764	0,11262	0,05508
6.	17,705	0,18655	17,36-18,05	7	0,13725	0,0493	0,01302
7.	19,105	0,07280	18,05-20,16	9	0,17647	-0,10367	0,14763
∑	51			51			0,3243

$$(\chi^2) = \sum_{i=1}^{7} \frac{(n_{tj} - n_{ej})^2}{n_{tj}} = 0{,}3243$$

Оценка критических значений $\chi^2_{кр}$ для логнормального распределения по табл. 8 [236] для уровней значимости (0,025, 0,05 и 0,1) дали следующие значения:

$\chi^2_{кр}$ (0,025) =0,2970; $\chi^2_{кр}$ (0,05) =0,4840; $\chi^2_{кр}$ (0,1) = 1,0640.

При двух уровнях (0,05 и 0.1) значимости получаем $\chi^2 < \chi^2_{кр}$. Только при предельном уровне значимости α=0,025, $\chi^2 > \chi^2_{кр}$ Следовательно, гипотеза 2 о том, что случайная глубина внедрения осколков в преграду подчиняется логнормальному закону распределения также не отвергается.

На рис. 5.9 представлен график теоретической плотности вероятности для нормального, логнормального и вид эмпирического распределения по данным выборки.

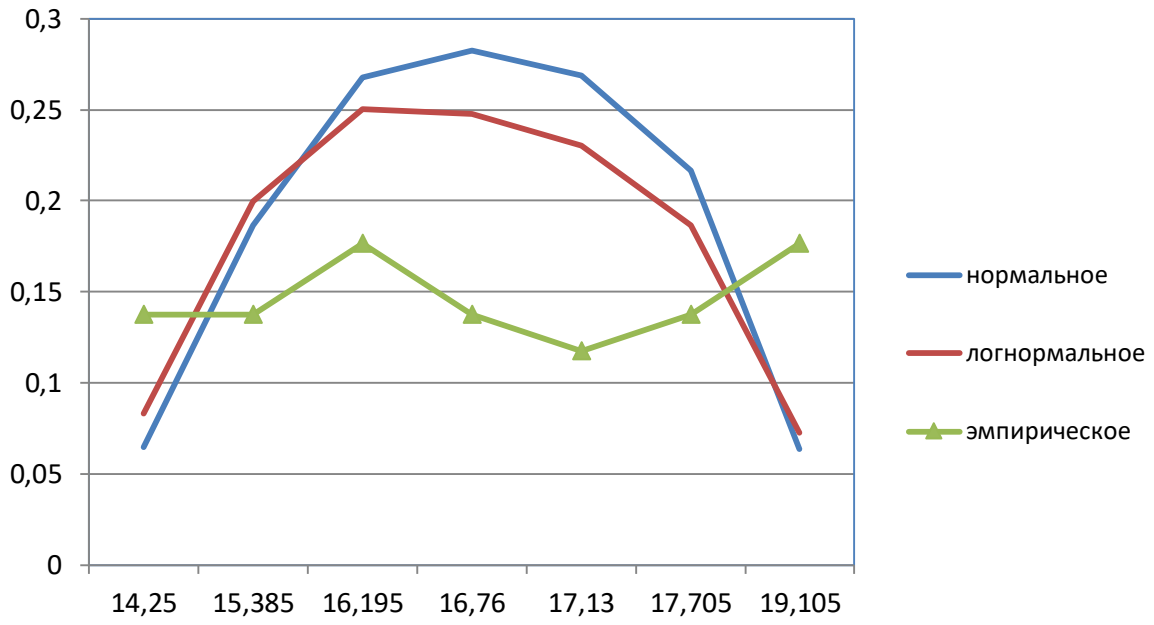

Рис. 5.9 - Теоретическая плотность вероятности для нормального, логнормального и вид эмпирического распределения по данным выборки 5

Гипотеза 3: Глубина внедрения осколков в преграду подчиняется закону распределения Вейбулла-Гнеденко. Закон Вейбулла-Гнеденко проявляется в объектах, разрушение которых определяется предельным

отклонением (модель слабого звена). Плотность распределения Вейбулла-Гнеденко (двухпараметрического):

$$f_v(x) = \begin{cases} \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}, x \geq 0 \\ 0, \quad x < 0 \end{cases} \quad (5.24)$$

где, a — параметр масштаба; b — параметр формы.

Параметр b определяют по специальным таблицам в зависимости от коэффициента вариации. При b = 1 распределение Вейбулла — Гнеденко близко к экспоненциальному закону распределения, при b = 2,5- 3,5 — к нормальному. Вследствие такого видоизменения распределение Вейбулла — Гнеденко считают очень гибким законом.

Точечные оценки параметров генеральной совокупности были рассчитаны по выборке 5 (приложение В): $\overline{X}$ = 16,672 мм; $\sigma_{\bar{x}}$= 1,408. Обозначим матрицу-столбец указанных частот n_{ej}. Границы интервалов были найдены по заданным значениям теоретических частот попаданий в интервалы. Схема расчета для распределения Вейбулла-Гнеденко включает следующие этапы [240]:

1. По исходному ряду определяются выборочное среднее (x) и коэффициент вариации (*Cv*);

2. В зависимости от *Cv* по табл. 1 или графику 2 определяются параметры a и b в соответствии с [241] для коэффициента вариации 0,08 получаем значения a=1,035 и b=15,35.

Оценка критических значений $\chi^2_{кр}$ для распределения Вейбулла-Гнеденко по табл. 8 в соответствии с [236] для уровней значимости (0,025, 0,05 и 0,1) дали следующие значения:

$\chi^2_{кр}$ (0,02) =0,2970; $\chi^2_{кр}$ (0,05) =0,4840; $\chi^2_{кр}$ (0,1) = 1,0640.

При всех указанных уровнях значимости получаем $\chi^2 < \chi^2_{кр}$. Следовательно, гипотеза 3 о том, что глубина внедрения осколков в преграду подчиняется закону распределения Вейбулла-Гнеденко также не отвергается.

Критерий согласия Фишера.

Задача сравнения дисперсий сводится к проверке нулевой гипотезы, заключающейся в принадлежности двух выборок к одной и той же генеральной совокупности. Определим критерий согласия Фишера для подтверждения гипотез о законе распределения поражающего действия осколков при ТА с применением использование функции ЛИНЕЙН() в Microsoft Excel.

Функция ЛИНЕЙН() рассчитывает статистику для ряда с применением метода наименьших квадратов, чтобы вычислить прямую линию, которая наилучшим образом аппроксимирует имеющиеся данные и затем возвращает массив, который описывает полученную прямую. Функцию ЛИНЕЙН() также можно объединять с другими функциями для вычисления других видов моделей, являющихся линейными по неизвестным параметрам, включая полиномиальные, логарифмические, экспоненциальные и степенные ряды. Поскольку возвращается массив значений, функция должна задаваться в виде формулы массива.

Уравнение для прямой линии имеет следующий вид:

$y = m_x + b$ или $y = m_1x_1 + m_2x_2 + ... + b$, если существует несколько диапазонов значений x, где зависимые значения y — функции независимых значений x. Значения m — коэффициенты, соответствующие каждому значению x, а b — постоянная. Обратите внимание, что y, x и m могут быть векторами. Функция ЛИНЕЙН() возвращает массив {mn;mn-1;...;m1;b}. Функция ЛИНЕЙН() может также возвращать дополнительную регрессионную статистику.

Представим и обработаем результаты экспериментов в ППП Excel. В качестве материала образца для испытаний: доска сосновая. Первоначальная скорость осколка v_1 = 130 м/с. В приложении В представлена выборка 1 испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной скорости встречи осколков

разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины его внедрения в нее, где в первом столбце расположены номера испытаний по порядку, а во втором столбе расположены соответствующие им глубины внедрения в мм.

Факторный закон воздействия можно привести к линейному виду (рис.5.10).

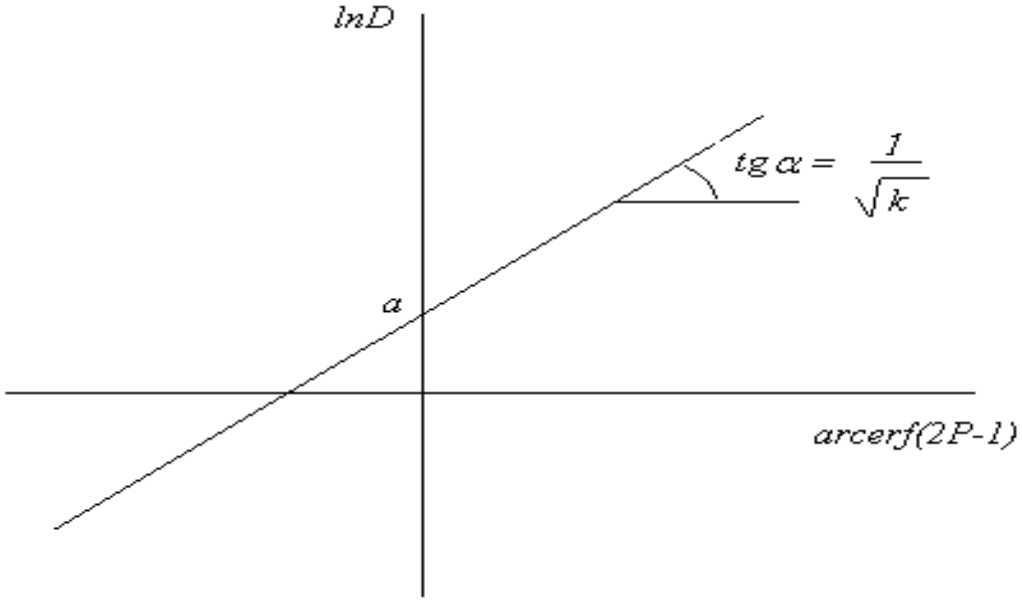

Рис. 5.10 - Линейный вид ФЗВ

ФЗВ примет следующий вид:

$$\ln D = \ln D_{50} + \frac{1}{\sqrt{k}} arcerf((2P-1)$$

Или

$$arcerf\left((2P-1\right) = \sqrt{k}\ln D - \sqrt{k}\ln D_{50}$$

Для этого применим метод наименьших квадратов.

На рис. 5.11 представлен график ФЗВ для логарифмически нормального факторного закона воздействия ПФ источников ЧС.

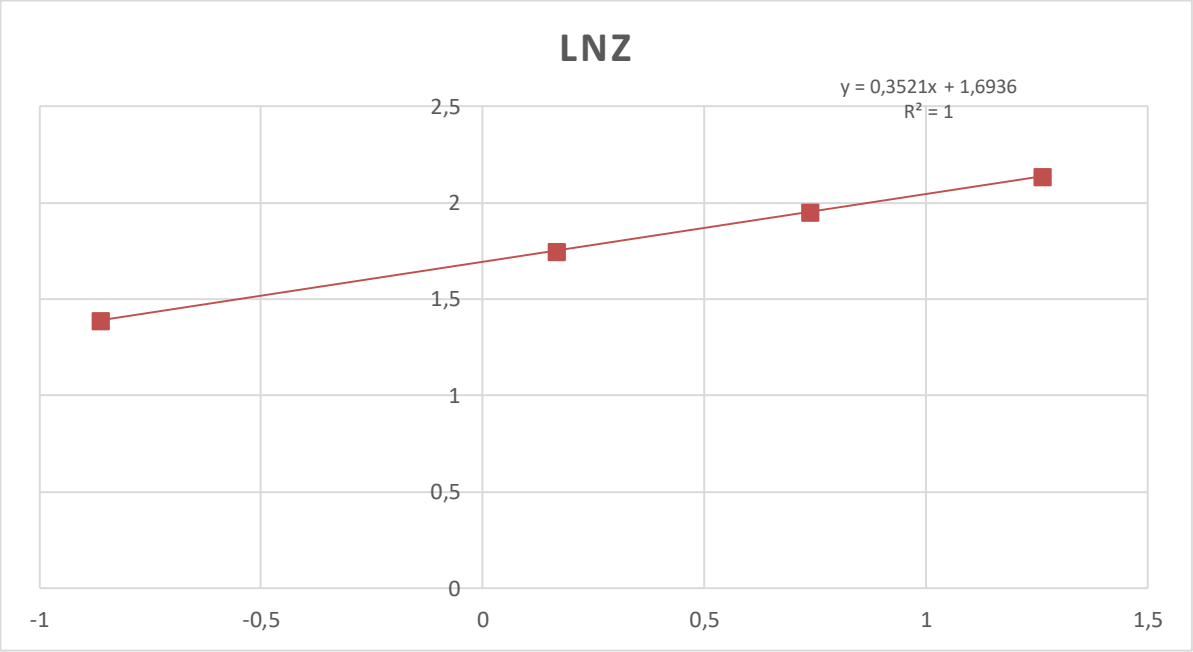

Рис. 5.11 - График ФЗВ (логарифмически нормальный факторный закон)

В таблице 5.11 представлен состав показателей дополнительной регрессионной статистики.

Таблица 5.11 - Состав показателей статистики для функции ЛИНЕЙН()

se1,se2,...,sen	Стандартные значения ошибок для коэффициентов m1, m2,..., mn.
seb	Стандартное значение ошибки для постоянной b (seb = #Н/Д, если аргумент ***конст*** имеет значение ЛОЖЬ).
r2	Коэффициент детерминированности. Сравниваются фактические значения y и значения, получаемые из уравнения прямой; по результатам сравнения вычисляется коэффициент детерминированности, нормированный от 0 до 1. Если он равен 1, то имеет место полная корреляция с моделью, т. е. различий между фактическим и оценочным значениями y нет. В противоположном случае, если коэффициент детерминированности равен 0, использовать уравнение регрессии для предсказания значений y не имеет смысла.
sey	Стандартная ошибка для оценки y.
F	F-статистика или F-наблюдаемое значение. F-статистика используется для определения того, является ли случайной наблюдаемая взаимосвязь между зависимой и независимой переменными.
df	Степени свободы. Степени свободы полезны для нахождения F-критических значений в статистической таблице. Для определения уровня надежности модели необходимо сравнить значения в таблице с F-статистикой, возвращаемой функцией ЛИНЕЙН(). Дополнительные

	сведения о вычислении величины df см. в подразделе "Замечания" в конце данного раздела.
ssreg	Регрессионная сумма квадратов.
ssresid	Остаточная сумма квадратов.

На приведенном ниже рисунке 5.12 показано, в каком порядке возвращается дополнительная регрессионная статистика.

	A	B	C	D	E	F
1	m_n	m_{n-1}	. . .	m_2	m_1	b
2	se_n	se_{n-1}	. . .	se_2	se_1	se_b
3	r_2	se_y				
4	F	d_f				
5	$ss_{рег.}$	$ss_{ост.}$				

Рис. 5.12 - Порядок возвращения дополнительной регрессионной статистики

В таблице 5.12 приведена дополнительная статистика для выборки 1.

Таблица 5.12 - Дополнительная статистика для выборки 1

b	a	Параметры распределения	
0,35208	1,693615	he	5,44
0,001638	0,001398	korK	2,840
0,999957	0,002584	$ско_{lnh}$	0,249
46183,23	2	коэф. корр. уравнения прямой	1,000
0,308398	1,34E-05		
		значимость	<0,01

Проведем статистическое исследование с той же выборкой для определения вида ФЗВ для распределения Вейбулла.

Результаты экспериментов обработаны в ППП Excel, Материал образца: доска сосновая, v1 = 130 м/с. В приложении В приведена выборка 1

испытаний образцов в целях определения по экспериментальным данным параметров закона распределения случайной скорости встречи осколков разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины его внедрения в нее.

Факторный закон воздействия можно привести к линейному виду, применив метод наименьших квадратов (рис.5.13).

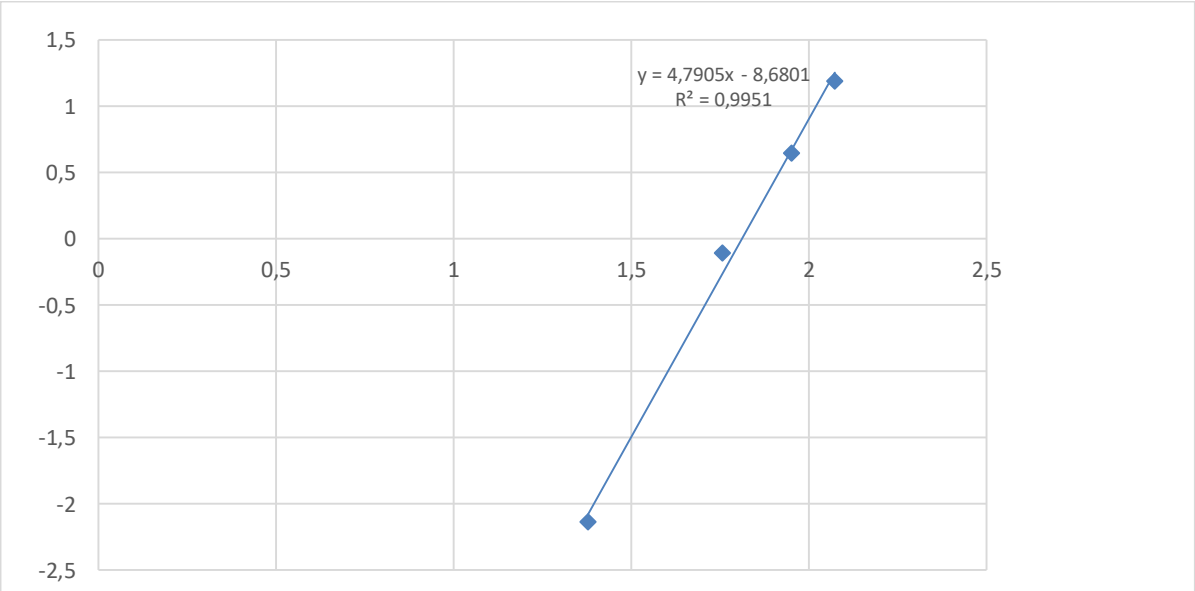

Рис. 5.13 - График ФЗВ (закон Вейбула)

Критерий значимости Фишера

По критерию значимости Фишера в с применением функции ЛИНЕЙН в Microsoft Excel получены следующие значения F критерия:

для логарифмически нормального факторного закона – 46183,23;

для распределения Вейбула – 406,09.

Чем больше *F* критерий, тем лучше выборка экспериментальная подходит к выборке, построенной из теоретической модели. По такой же методике были получены статистики для выборок 2-5.

Критерий согласия Колмогорова

В статистике критерий согласия Колмогорова (также иногда ошибочно представляемый, как критерий согласия Колмогорова — Смирнова) используется для того, чтобы определить, подчиняются ли два эмпирических распределения одному закону, либо определить, подчиняется ли полученное

распределение предполагаемой модели. Критерий советского математика А. Н. Колмогорова (1903—1987) основан на определении максимального расхождения между накопленными частотами эмпирических или теоретических распределений. Переход от параметрической статистики Пирсона, Стьюдента и Фишера к непараметрической статистике Колмогорова и Смирнова соответствует переходу от старой парадигмы к новой, от устаревших и не соответствующих реальности постановок задач анализа данных к современным статистическим методам [238]. Статистика критерия Колмогорова предназначена для проверки согласия эмпирического распределения с заданным непрерывным теоретическим распределением [237-239]. Критерий Колмогорова исчисляется по следующим формулам:

$$\lambda = \frac{D}{\sqrt{N}} \tag{5.25}$$

или

$$\lambda = d\sqrt{N}$$

Определим критерий согласия Колмогорова и модифицированный критерий согласия Колмогорова [239] для данных выборок 1, 2 и 5, Подробные расчеты представлены в приложении Г (в среде MathCAD). Проверим согласуется ли эмпирическое распределение с заданным непрерывным теоретическим распределением, например, нормальным (рис. 5.14).

$$\lambda n := Dn \cdot \sqrt{n} \tag{5.26}$$

$\lambda n = 1.241$

$$\lambda nz := Dn \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right) \quad (5.27)$$

$\lambda nz = 1.278$

Для логнормального распределения:

$$\lambda l := Dl \cdot \sqrt{n} \quad (5.28)$$

$\lambda l = 0.913$

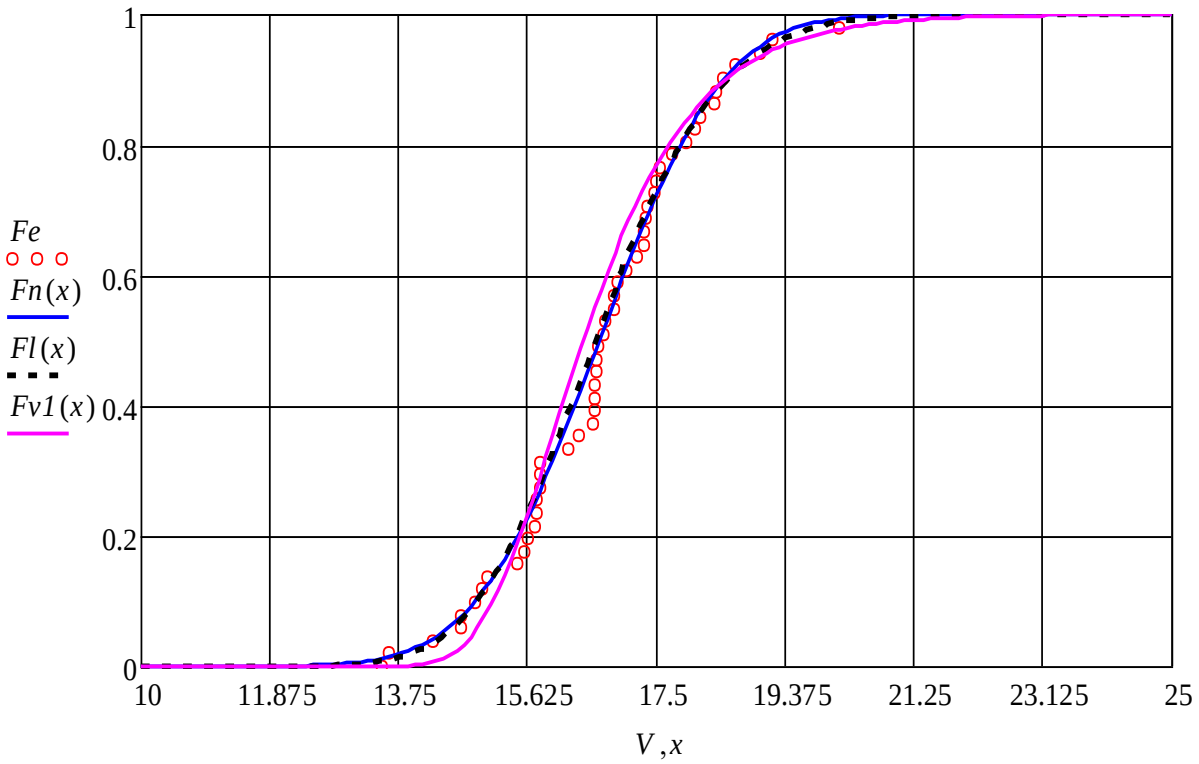

Рис. 5. 14 - Интегральное теоретическое и эмпирическое распределение

$$\lambda lz := Dl \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right) \quad (5.29)$$

$\lambda lz = 0.94$

Анализ полученных результатов показывает, что полученные значения критериев для выборки 1 и 2 меньше чем их табличные критические значения с соответствующим уровнем значимости. Для этих выборок нулевая

гипотеза не отвергается. Для логнормального распределения для выборки 1 показаны лучшие результаты по сравнению с нормальным. Для выборки 5 нулевая гипотеза не подтверждается. При небольшом числе наблюдений по критерию Колмогорова подтверждается согласие даже явно несовместимых распределений. Однако при большом числе наблюдений (более 50) критерий Колмогорова способен обнаружить любое отступление от гипотезы. Это означает, что любое отличие распределения выборки от теоретического будет с его помощью обнаружено, если наблюдений будет достаточно много. Практическая значимость этого свойства в нашем случае существенна, так как возможно получение достаточно большого числа наблюдений в неизменных условиях, хотя теоретическое представление о законе распределения, которому должна подчиняться выборка, всегда приближенное, а точность статистических проверок обычно не должна превышать точность выбранной модели.

5.4 Выводы по главе 5

На основе имеющихся экспериментальных данных о поражении различных объектов разработана методика по определению параметров и определены сами параметры ФЗВ. Разработанная методика проведения испытаний образцов позволяет определить по экспериментальным данным параметры факторного закона воздействия осколков разрушенных конструкций промышленного объекта с заданной преградой и глубины внедрения в нее.

Рассмотрены результаты испытаний стойкости материала преграды к воздействию поражения обломками. Проверены гипотезы о законе распределения глубины внедрения осколков разрушенных конструкций промышленного объекта в заданную преградой. Данные выборки не противоречат гипотезам о распределении глубины внедрения осколков по нормальному, логарифмически-нормальному или закону Вейбулла-Гнеденко.

Приведены результаты экспериментальной проверки гипотезы предложенного ФЗВ в форме логарифмически нормального закона. Статистическая проверка показала, что по критерию Фишера для описания действия ПФ источников ЧС на элементы конструкций СХПЖРО возможно использовать ФЗВ в виде как логарифмически нормального закона, так и Вейбулла-Гнеденко. Гипотезу о возможности того, что ФЗВ может быть описан нормальным, логарифмически нормальным и Вейбулла распределением по критериям Пирсона можно признать не противоречащей полученным экспериментальным данным и с некоторой вероятностью можно утверждать, что расхождения между теоретическими и эмпирическими частотами случайны. По критерию Колмогорова не все выборки прошли проверку. По модифицированному критерию Колмогорова только выборка 1 прошла проверку на согласование эмпирического и теоретического распределений вероятности.

Глава 6 ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ СХПЖРО НА ПАТЭС ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПФ ИСТОЧНИКОВ ЧС

6.1 Разработка математической модели защищенности ПОО

Глава посвящена обоснованию способов повышения защищенности СХПЖРО на ПАТЭС, как ПОО, от воздействия ПФ источников ЧС. Представлена схема исследования защищённости объектов. Предложена математическая модель защищенности ПОО, которая позволяет учитывать конструктивно-технические и эксплуатационно-технические факторы, влияющие на ее уровень. В общем случае математическая модель может быть представлена функционалом, устанавливающим взаимосвязь между уровнем защищенности ПОО и их элементов:

$$\varphi = \Phi\left[F(r_i, \tau, N), \quad u(r_i, \tau, N, a_j)\right] \tag{6.1}$$

где $F(r_i, \tau, N)$ — функциональное представление структуры ПОО и взаимосвязи элементов в течение времени τ ; r_i – показатель защищенности i–го элемента; N — число учитываемых элементов в комплексе; u — оператор, учитывающий влияние ПФ на уровень защищенности ПОО; a_j — j-я характеристика ПФ; φ — показатель защищенности ПОО. Виды связей модели отображаются операторами Ф [·] и F [·]. Форма представления этих операторов (аналитическая или статистическая) определяет принцип построения модели. Таким образом, комплекс взаимосвязанных моделей защищенности ПОО должен включать:

группу математических моделей отдельных элементов системы СХПЖРО, в которых в наиболее полной мере учитываются внутренние, специфические для данных элементов, факторы;

более общие модели для групп элементов (функциональных подсистем);

обобщенную модель защищенности ПОО.

Следовательно, построить модель элемента — это значит разработать математическую модель защищенности, раскрывающую зависимость между защитной способностью, уровнем ПФ источников ЧС и параметрами состояния элемента. Эти зависимости назовем «моделями защищенности» и представим в обобщающем виде

$$\{\Theta_r\} = \{F_r(x_i, \nu_k, a_j)\} \qquad (6.2)$$

где $\{\Theta_r\}$ r–й параметр состояния элемента, определяющий способность нормального функционирования; x_i — уровень i–го ПФ источников ЧС; ν_k – характеристика защитной способности; a_j — характеристики, связанные с функциональными или конструктивными особенностями элемента.

На рис. 6. 1 представлена схема исследования защищенности ПОО.

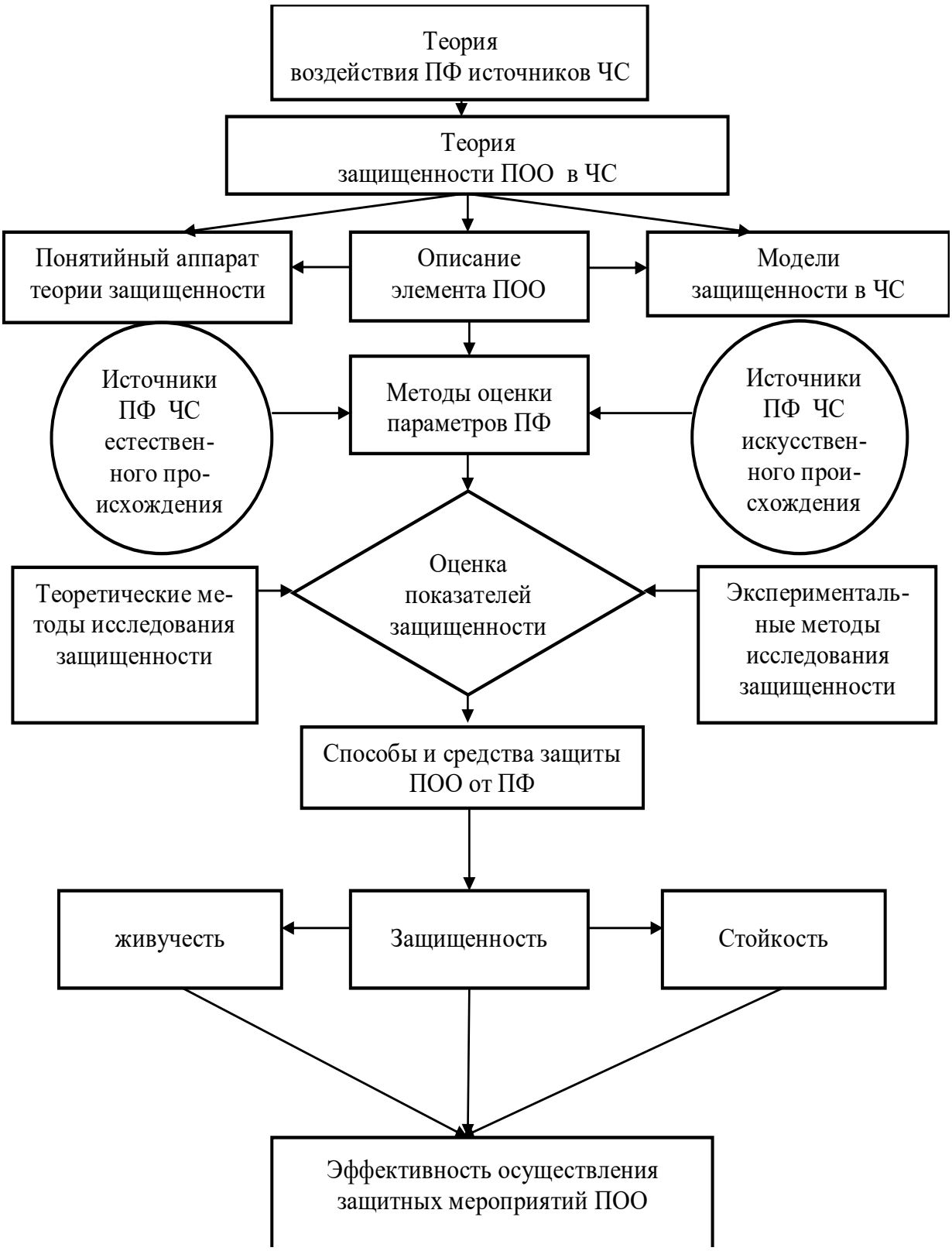

Рис. 6. 1 - Схема исследования защищенности ПОО

Таким образом, защищенность, обеспечиваемая элементом нижнего уровня определяется как функционал от трех групп переменных параметров – поражающих воздействий, защитной способности элемента и его функциональных и конструктивных особенностей.

Обобщенная форма модели может быть представлена в виде:

$$\{\Theta\} = H\{x\} \tag{6.3}$$

где $\{x\}$ — множество значений x из пространства X, $x \in$ X, характеризующих внешнее воздействие; $\{\Theta\}$ – множество значений Θ из пространства Q , $\Theta \in Q$, характеризующих реакцию элемента на внешнее воздействие.

Структура и свойства объектов экономики характеризуются оператором H, посредством которого каждой реализации внешнего воздействия x приводится в соответствие реализация поведения Θ. Математическая природа элементов обоих пространств произвольна: это могут быть числа, векторы, функции одной или нескольких переменных. Оператор H задается соответствующими уравнениями, а также начальными и граничными условиями.

Множество состояний элемента, допустимые с точки зрения нормального функционирования, образуют область допустимых значений Q. Граница этой области соответствует предельным состояниям по стойкости. Если $\Theta \in Q$, то это означает, что выходной параметр элемента находится в установленных допусках, а выходной параметр q является допустимым для нормального функционирования.

Таким образом, операторное соотношение (6.3) устанавливает связь между величинами x пространства входных параметров X, значениями пространства выходных параметров и их допустимыми значениями.

Детерминированный подход основывается на использовании моделей «нагрузка-стойкость», где в качестве исходных рассматриваются

действующие нагрузки, создаваемые ПФ источника ЧС любой физической природы, и характеристики несущей способности объекта воздействия. При этом параметры нагрузки и несущей способности рассчитываются по формулам, в которых исходные данные, величины влияющих характеристик и коэффициентов носят строго определенный характер.

Так, для нагрузки, создаваемой мгновенным ПФ

$$X_i^m = f_i\,(q, R, k), \tag{6.4}$$

где X_i^m – параметр i-го ПФ; q – мощность источника ПФ (ЯВ); R – расстояние от источника до объекта; k – коэффициент, учитывающий взаимодействие со средой.

Для длительных ПФ

$$X_i^Д = f_i\,[q, C_i\,(x, y), k, t], \tag{6.5}$$

где $C_i(x, y)$ – показатель скорости изменения параметра ПФ во времени в точке с координатами x, y; t – продолжительность воздействия.

Наносимый ПОО ущерб представляется в виде события, являющегося детерминированной функцией расчетной схемы величин X_i^m и $X_i^Д$ и способности объекта противостоять этому воздействию. Объект считается пораженным, если нагрузка превышает его несущую способность, и наоборот. В параметрической форме условие поражения записывается следующим образом:

$$X_i^m > X_{i\ доп}^m;\ X_i^Д > X_{i\ доп}^Д, \tag{6.6}$$

где $X_{i\ доп}^m$, $X_{i\ доп}^Д$ – показатели несущей способности объекта при воздействии i-го мгновенного или длительного фактора. Обычно эти показатели называют показателями стойкости. Стойкостью, как отмечалось, называется способность (свойство) объекта сохранять параметры, определяющие его нормальную работоспособность, в пределах установленных норм во время и после воздействия ПФ [218, 219]. Показателями стойкости являются максимальные значения параметров

действующих ПФ, при которых сохраняются нормальное функционирование объекта. Часто эти показатели называют допустимыми значениями параметра $X_{i\ \text{доп}}$.

Требования по стойкости разрабатываются и обеспечиваются, как правило, на этапе проектирования СХПЖРО.

Для созданных технических объектов стойкость становится их внутренним свойством и может быть изменена только путем модернизации, реконструкции или использования специальных защитных мер.

Показатели стойкости определяют или на натурных испытаниях с применением средств воздействия или на моделирующих установках, или путем теоретических расчетов с последующей экспериментальной проверкой.

В последнем случае исследуется обобщенная модель объекта в виде

$$\{Y_i\} = H\{X_i\}, \tag{6.7}$$

где X_i – множество значений ПФ, характеризующих внешнее воздействие; Y_i – множество значений параметров, характеризующих реакцию объекта на эти воздействия.

Оператор H характеризует структуру и свойства объекта, при его помощи каждой реализации внешнего воздействия ставится в соответствие реализация реакции объекта.

При использовании приведенного соотношения устанавливается критерий стойкости в виде признака или правила нормальной работоспособности, как это определяется в нормативной научно-технической или эксплуатационной документации

$$a \le Y(X_i) \le b,\ X_i = X_{i\text{доп}} \tag{6.8}$$

где a, b — допуски на выходной параметр объекта.

При этом из ряда значений уровней ПФ, соответствующих допуску параметров, в качестве показателя стойкости выбирают наименьшее граничное значение

$$X_{i\text{доп}} = \min\{ X_i^{ср} \}, \quad Y_i = Y_{i\text{доп}} \qquad (6.9)$$

Несомненным достоинством детерминистского метода является его наглядность, так как результат доводится до физически ясно осмысливаемого правила определения ожидаемых последствий. По этой причине метод в параметрической форме широко используется при практических расчетах как для оценки стойкости, так и для задания требований по стойкости при проектировании. При этом требования задаются в виде множества $X_{i\text{доп}}$, которому должны удовлетворять стойкость объекта по каждому из ПФ источника ЧС.

При оценке опасности ТА более распространенным является использование показателей стойкости в виде радиусов (дальностей) поражения для мгновенных ПФ и допустимого времени – для длительных.

Действительно, если считать характеристики источника ПФ и среды заданными (q, k = const), то

$$X_i^{м} = f(R_i, \text{const}) \text{ и } R_i = f^{-1}(\text{const}, X_i^{м}) \qquad (6.10)$$

где f^{-1} — обратная функция, R_i – расстояние от центра воздействия ПФ источника ЧС до точки, в которой определяется параметр i-го ПФ.

Соответственно для показателей стойкости

$$X_{i\ \text{доп}}^{м} = f(R_{i\text{п}}, \text{const}), \ R_{i\text{п}} = f^{-1}(\text{const}, X_{i\ \text{доп}}^{м}) \qquad (6.11)$$

где $R_{i\text{п}}$ — радиус (дальность) поражения, т.е. расстояние, соответствующее минимальному допустимому значению параметра ПФ.

Тогда масштабы поражающего действия на данный объект записываются в виде

$$R_i(\text{const}, X_i^{м}) \geq R_{i\text{п}} = (\text{const}, X_{i\ \text{доп}}^{м}) \qquad (6.12)$$

Подобная форма критерия наиболее удобна в тех случаях, когда приходится оценивать действие совокупности разнородных ПФ. Тогда

$$[R_{\text{п}} = \max_i \{R_{i\text{п}}\}] < R(\text{const}) \qquad (6.13)$$

При этом радиусы поражения могут быть определены и с учетом градации по степеням поражения для каждого вида объектов (отсутствие повреждений, повреждения слабой, средней и сильной степени, например, для ПОО).

Для длительных ПФ источников ЧС можно записать

$$X_i^{Д} = f(\text{const}, c_i, \tau) = \text{const} \int_{\tau} c_i(t)\text{dt} \qquad (6.14)$$

где τ — продолжительность воздействия.

$$X_{i\ \text{доп}}^{Д} = \text{const} \int_{\tau_{\text{доп}}} c_i(t)\text{dt} \qquad (6.15)$$

и условие сохранения записывается в виде

$$\tau_{\text{доп}}(X_{i\ \text{доп}}^{Д}) > \tau(X_i^{Д}) \qquad (6.16)$$

где $\tau_{\text{доп}}(X_{i\ \text{доп}}^{Д})$ — допустимое время пребывания в поле длительно действующих ПФ.

Рассматриваемый метод позволяет оценить результаты воздействия как на составные части объекта (блок, узел, агрегат и т.д.), так и на объект (систему) в целом. Показатели, относящиеся к объекту (системе) в целом, называются общими показателями стойкости, а к составным частям и элементам – частными. Для оценки состояния объекта используется принцип «критического элемента», в соответствии с которым стойкость совокупности элементов не может быть ниже уровня стойкости наименее стойких элементов, т.е.

$$X_{i\text{доп}} \geq \min\{X_{ij\text{доп}}\} \qquad (6.17)$$

$$R_{i\text{п}} \leq \max\{R_{ij\text{п}}\} \qquad (6.18)$$

где $X_{ij\text{доп}}$ — показатель стойкости j-го элемента по i-му ПФ; $R_{ij\text{п}}$ – радиус поражения j-го элемента по i-му ПФ. Таким образом, детерминистский метод состоит из двух основных этапов.

На первом из них вычисляются параметры ПФ источника ЧС (X_i) или соответствующие расстояния (R_i) и предельные значения действующих

нагрузок ($X_{i\text{доп}}$, $R_{\text{п}}$). Второй этап состоит в сопоставлении результатов воздействия с допустимыми значениями выходных характеристик объекта или допустимыми значениями параметров ПФ. Будучи элементарным, второй этап в то же время является весьма важным, так как на этом этапе выбирается и обосновывается требуемый уровень защищенности.

Защищенность объекта можно охарактеризовать количественно при помощи коэффициентов (показателей) защищенности, которые описывают ослабление внешних воздействий на объекты

$$X_i' = X_i / K^з \tag{6.19}$$

или повышение его стойкости

$$X_{i\,\text{доп}}' = X_{i\,\text{доп}} K^з \tag{6.20}$$

где X_i', $X_{i\,\text{доп}}'$ — значения действующей нагрузки и ее допустимого значения с учетом защитных мер.

Условие сохранения можно записать в виде

$$K_X^з = \frac{X_{i\text{доп}}}{X_i} \geq 1,\ K_R^з = \frac{R_i}{R_{in}} \geq 1,\ K_\tau^з = \frac{\tau_{\text{доп}}}{\tau} \geq 1 \tag{6.21}$$

где $K_X^з$, $K_R^з$, $K_\tau^з$ — коэффициенты (показатели) защищенности по параметру, расстоянию, времени соответственно.

Если условия (6.21) выполняются, то сохранение объекта при воздействии обеспечивается. В противном случае необходимы дополнительные усилия по повышению защищенности. При этом требуемое значение показателя защищенности будет равно (по параметру, например)

$$(K_X^3)_{\text{треб}} = \frac{1}{K_X^3},\ K_X^3 \leq 1 \tag{6.22}$$

и

$$X_{доп}(K_x^з)_{\text{треб}} \geq X \tag{6.23}$$

где $(K_x^з)_{\text{треб}}$ — требуемое значение показателя защищенности.

Основным недостатком рассмотренного метода является неучет случайного характера величин X и $X_{доп}$, причиной которого служит наличие неопределенностей, формирующих их значения на всех этапах процесса воздействия ПФ.

Как правило, расчетные формулы для этих величин получены для некоторых усредненных исходных данных, приводящих к определенной идеализации физических моделей формирования ПФ источников ЧС. Поэтому неопределенность аргументов, образующих основные расчетные формулы, как правило, устранить не представляется возможным. Это, в свою очередь, не позволяет оперировать точными значениями величин X и $X_{доп}$. В каждом конкретном случае они будут принимать случайное, заранее неизвестное, но какое-то одно значение. Для устранения влияния неопределенностей на результаты оценки используется вероятностный метод оценивания результатов воздействия ПФ. Этот метод удобен и для получения обобщенных вероятностных показателей поражения или сохранения объекта, для того чтобы установить их взаимосвязь с более общими системными показателями, такими как показатели живучести и эффективности, которые, как правило, задаются в вероятностной форме. Три тесно связанных идеи положены в основу вероятностного метода:

условия формирования и распространения ПФ источников ЧС, а также реакция объекта на их воздействие есть случайные события или процессы;

понятие «поражение» трактуется как вероятность выхода параметров объекта за пределы области допустимых значений;

в зависимости от характера ПФ источников ЧС событие «поражение» происходит или мгновенно, или в результате постепенного накопления ущерба.

В общем случае вероятностные показатели при оценке воздействия ПФ представляются численными значениями вероятности того, что случайное значение воздействующего параметра X будет меньше его некоторого

значения, т.е. Вер ($X < x$), или не меньше этого значения Вер ($X \geq x$), или находиться в определенных пределах Вер ($x_1 \leq X \leq x_2$).

Наиболее общим и распространенным способом определения этих вероятностей является задание функции распределения

$$\mathrm{F}(x) = P(X < x) \tag{6.24}$$

$$1 - \mathrm{F}(x) = (X \geq x) \tag{6.25}$$

$$\mathrm{F}(x_2) - \mathrm{F}(x_1) = P(x_1 \leq X \leq x_2) \tag{6.26}$$

Тогда выражение для вероятности поражения может быть записано в общем виде

$$P_{\text{п}} = P\{X \geq X_{\text{доп}}\} = P\{X - X_{\text{доп}} > 0\} \tag{6.27}$$

Таким образом, вероятностный подход полностью не заменяет собой детерминистский. При его осуществлении так же необходимо рассчитывать величины X и $X_{\text{доп}}$, дополняя эти расчеты определением характеристик случайных величин, что приводит к возрастанию объема решаемой задачи (6.24-6.27). Выражения устанавливают зависимость вероятности получения эффекта от параметров ПФ источников ЧС. Поэтому, вероятность $P_{\text{п}} = P\{X_{\text{доп}} < x\}$ обозначают через $G(X)$ и называют факторным (параметрическим) законом воздействия (ФЗВ). Тогда, интегрируя (6.27), получим

$$P_{\text{п}} = \int_0^{\infty} G(X) \cdot f(X) \mathrm{dx} \tag{6.28}$$

Учитывая, что параметр X зависит от расстояния, получим координатный закон воздействия (КЗВ)

$$G(R) = \int_0^{\infty} G(X) \cdot f(X_R) \mathrm{dx} \tag{6.29}$$

который устанавливает зависимость между вероятностью поражения и расстоянием от центра взрыва. Здесь $f(X_R)$ – функция плотности распределения параметра ПФ на расстоянии R.

На расстояниях $R \le R_a$ $G(R) = 1$, что соответствует зоне безусловного поражения; при $R_a < R \le R_{без}$ находится зона вероятного поражения, и при $R > R_{без}$ – зона безопасности.

Основными числовыми характеристиками КЗВ являются площадь ($S_п$) и радиус приведенной зоны поражения, т.е. зоны, в которой данные объекты получают поражение не ниже заданной степени с вероятностью, равной 1.

Так, для взрыва

$$dS_п = G(R)dS = 2\pi R \cdot G(R)dR \tag{6.30}$$

$$S_п = 2\pi \int_0^\infty R\, G(R)dR \tag{6.31}$$

$$R_П = \sqrt{2\int_0^\infty R\, G(R)dR} \tag{6.32}$$

Радиус приведенной зоны с точностью 2...3% равен расстоянию, на котором $G(R) = 0{,}5$. Это расстояние принимается за радиус поражения.

Практическое значение КЗВ заключается в том, что расчет вероятности поражения сводится к расчету вероятности попадания в приведенную зону поражения. Приведенную зону поражения можно рассматривать как ступенчатую аппроксимацию КЗВ

$$G(x, y) = \begin{cases} 1;\ x,\ y \in A_0 \\ 0;\ x \text{ или } y \notin A_0 \end{cases} \tag{6.33}$$

Тогда безусловная вероятность поражения точечного объекта будет равна:

$$P_п = \int_0^{R_n} G(R) \cdot g(R)dR \tag{6.34}$$

где $g(R)$ – плотность распределения точек воздействия. Обычно для техногенных взрывов принимают круговое нормальное распределение (закон Релея) [218, 219]:

$$g(R) = \frac{R}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \tag{6.35}$$

тогда

$$P_{\text{п}} = \int_0^{R_n} \frac{R}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) dR = 1 - \exp\left(-0{,}477\frac{Rn}{E}\right)^2 \tag{6.36}$$

где $E \approx 2/3\sigma$ – серединное вероятное отклонение (вероятность попадания в интервал $\pm E$ равна 0,5).

6.2 Методика по оценке состояния защищенности, позволяющая определить комплекс мероприятий, направленных на повышение защищенности исследуемого объекта СХПЖРО

Для того, чтобы ПАТЭС смогла своевременно реагировать своими ресурсами на угрозы и проявления ЧС, рассмотрена методика по оценке состояния защищенности, позволяющая определить комплекс мероприятий, направленных на повышение защищенности исследуемого объекта СХПЖРО.

Методика разработана на основе методических рекомендаций по разработке планов повышения защищенности критически важных объектов [229]. «В рассматриваемой методике определены шесть основных групп мероприятий, представляющих комплекс технических, организационных, охранных и других мероприятий, определяющих состояние защищенности СХПЖРО. В основу рассматриваемой методики положены метод анализа иерархий и метод экспертных оценок, которые базируются на представительной процедуре опроса специалистов-экспертов и последующей корректной обработке его результатов для формирования матрицы показателей важности объекта. Методика позволяет разрабатывать отличающиеся простотой и возможностью реализации без значительных материальных затрат организационные мероприятия защиты объектов

хранения и транспортировки ЖРО на ПЭБ. Для оценки состояния защищенности принята оценочная шкала от нуля до единицы с помощью которой можно оценить уровень защищенности объекта в зависимости от проведенных мероприятий. По шкале защищенности объекта максимально возможная степень защищенности равна 1,0 и достигается при полной реализации рационально спланированных мероприятий. Показатель реализации мероприятия с учетом степени его реализации ($L_{Ij...VIj}$) определяется как произведение соответствующего весового показателя реализации мероприятия для объектов 1-4 классов ($K_{Ij...VIj}$) на показатель степени реализации мероприятия ($R_{Ij...VIj}$)» [229].

$$(L_{Ij...VIj}) = (K_{Ij...VIj}) \times (R_{Ij...VIj}) \qquad (6.37)$$

«Примерный перечень мероприятий, направленных на обеспечение защищенности КВО, определен на основе комплекса мероприятий, приведенных в типовых планах повышения защищенности КВО объектового уровня, разработанных ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России. В предлагаемых Методических рекомендациях определен комплекс технических, организационных, охранных и других мероприятий, определяющих состояние защищенности КВО:

I. Инженерно-технические мероприятия:

1. Строительство защитных и инженерно-технических сооружений;

2. Обновление и модернизация систем аварийной защиты производства;

3. Организация и сооружение объездных путей;

4. Перевод производства на более безопасное сырье;

5. Подготовка резервных систем энергоснабжения, в т.ч. автономных;

6. Другие инженерно-технические мероприятия повышения защищенности КВО.

II. Мероприятия по совершенствованию физической защищенности (охраны):

7. Совершенствование физических барьеров и препятствий, систем контроля и управления доступом;

8. Совершенствование систем обнаружения проникновения нарушителей;

9. Совершенствование систем телевизионного наблюдения, технических средств предупреждения и воздействия.

III. Финансовое и материально-техническое обеспечение защищенности:

10. Создание финансовых и материально-технических резервов;

11. Создание топливно-энергетических запасов, воды, продовольствия и других материально-технических средств;

12. Приобретение специального аварийно-спасательного, пожарно-технического и другого оборудования, снаряжения и др.;

13. Приобретение техники, оборудования и имущества для обеспечения длительной автономной работы КВО.

IV. Совершенствование системы информатизации и управления:

14. Подготовка локальной системы оповещения;

15. Приобретение оборудования и средств связи;

16. Заблаговременное создание запасных (мобильных) пунктов управления;

17. Создание локальной системы мониторинга.

V. Совершенствование системы подготовки в области повышения защищенности:

18. Подготовка персонала в области защиты от ЧС;

19. Подготовка аппарата управления к действиям при угрозе ЧС и террористических актов;

20. Повышение готовности сил охраны;

21. Повышение готовности пожарно-спасательных формирований.

VI. Другие мероприятия по повышению защищенности (в составе

которых учтены мероприятия, не вошедшие ни в одну из предыдущих групп, но вносящие существенный вклад в повышение защищенности КВО):

22. Модернизация и обновление основных производственных фондов;

23. Выполнение планово-предупредительных ремонтов;

24. Обеспечение персонала средствами индивидуальной защиты» [229].

6.3 Мероприятия по предупреждению аварий и снижению ущерба

Для предупреждения аварийных ситуаций с перевозкой РМ необходимо предусматривать мероприятия по поддержанию защищённости на рассматриваемом объекте на приемлемом уровне.

К первоочередным мероприятиям следует отнести инженерно-технические мероприятия, которые направлены на предупреждение ТА:

Проектирование помещений для хранения газовых баллонов на ПАТЭС с учетом эффектов воздействия ПФ источников ЧС.

Проектирование унифицированного модуля-цистерны для МП РМ горизонтального типа, который может выполнять различные задачи, такие как МП широкого спектра жидких радиоактивных отходов различными видами транспорта с возможностью безопасной перегрузки, с учетом не только существующих норм для расчета и проектирования вагонов-цистерн [226], но и с учетом эффектов воздействия ПФ источников ЧС.

Проектирование помещений для хранения газовых баллонов на ПАТЭС с учетом эффектов воздействия ПФ источников ЧС предусматривает перемещение отсека с кислородными баллонами на безопасное расстояние в центр палубы – 15 м от ЛБ. На рис. 6.2 представлено первоначальное расположение помещений с кислородными баллонами вдоль левого борта ПЭБ

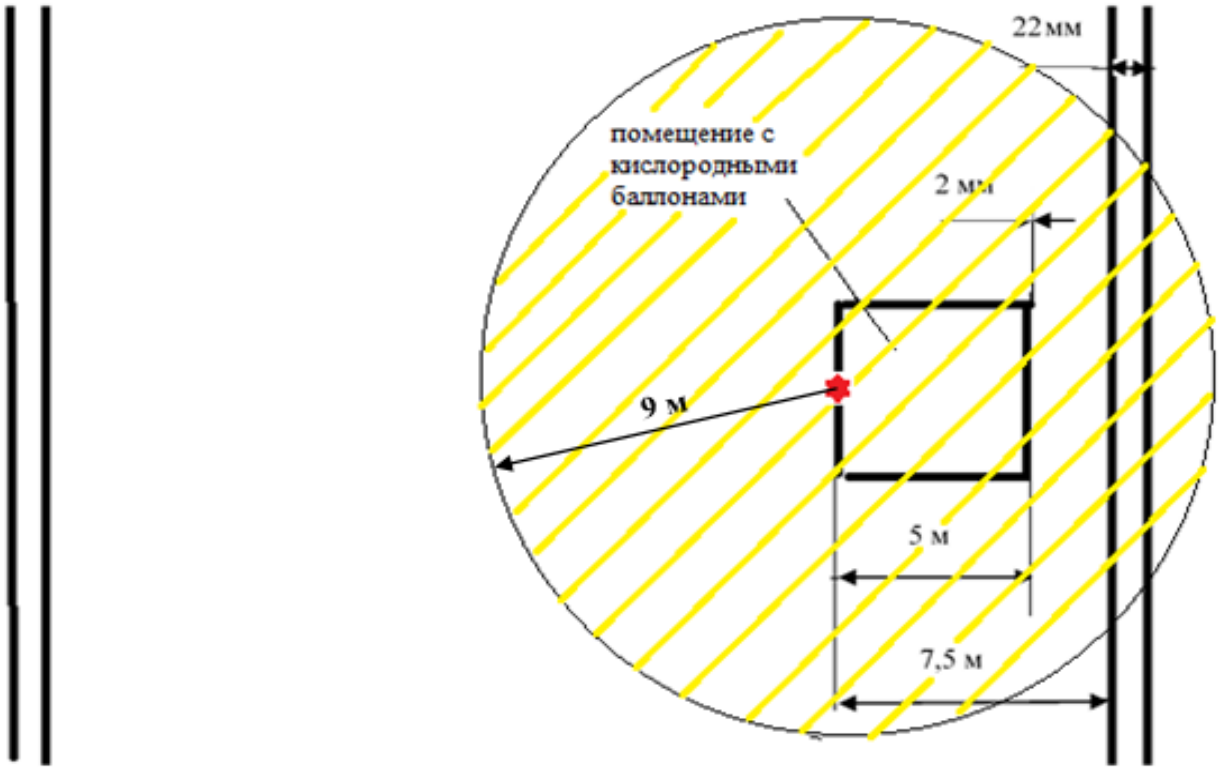

Рис. 6.2 - Зона опасного воздействия избыточного давления исходя из первоначального расположения помещения с кислородными баллонами вдоль левого борта ПЭБ

Толщина эквивалентной стальной преграды с учетом корпусных конструкций становится, мм, $\delta_{э2}$=65,5 мм. $\delta_{э2}>\delta_{Э}$

На рис. 6.3 представлено предлагаемое расположение помещений с кислородными баллонами на борту ПЭБ и показана зона опасного воздействия избыточного давления после перемещения отсека с кислородными баллонами.

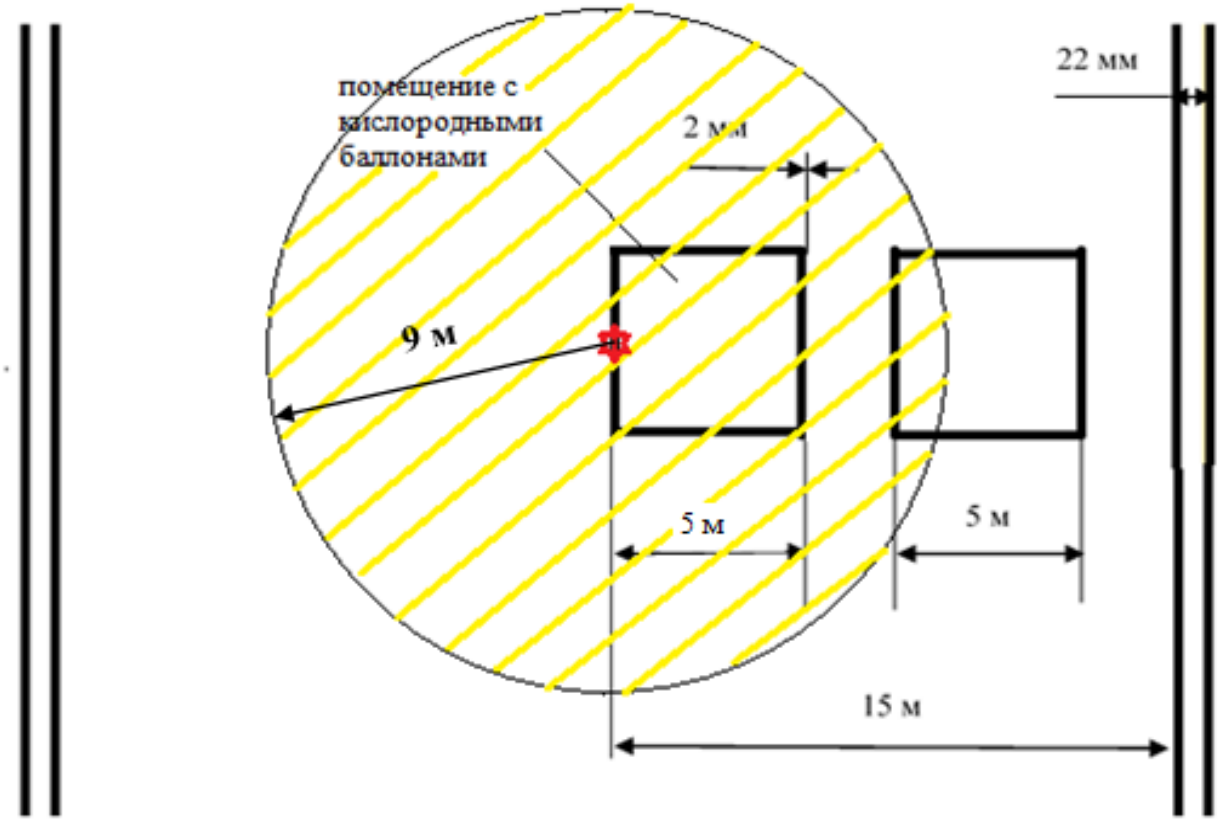

Рис. 6. 3 - Зона опасного воздействия избыточного давления после перемещения отсека с кислородными баллонами

«Защита наиболее уязвимых зон котлов цистерн может быть обеспечена комплексом технических средств, которые должны быть предназначены для однократного использования при авариях, а критерием эффективности должно быть сохранение герметичности котла даже при условии его пластической деформации. Кинетическая энергия, возникающая при аварийных режимах, должна быть поглощена деформирующимися или разрушающимися элементами защиты. Для защиты горловины люка-лаза и исключения повреждения сливо-наливной арматуры в случае опрокидывания контейнера и повреждения СХПЖРО в качестве защитной меры рассмотрен вариант защитного устройства в виде дуг и каркаса безопасности» [226].

В качестве инженерно-технического мероприятия безопасности СХПЖРО предложено рассмотреть возможность разработки унифицированного модуля-цистерны горизонтального типа для МП ЖРО на

базе унифицированного 20-футового морского контейнера (рис. 6.4), который может выполнять различные задачи, такие как транспортирование широкого спектра жидких радиоактивных отходов различными видами транспорта с возможностью более безопасной перегрузки с морского на железнодорожный транспорт по сравнению с существующими. На рис. 6.5 показана схема расположения, унифицированного танк–контейнера горизонтального расположения для ЖРО для МП на ж/д платформе.

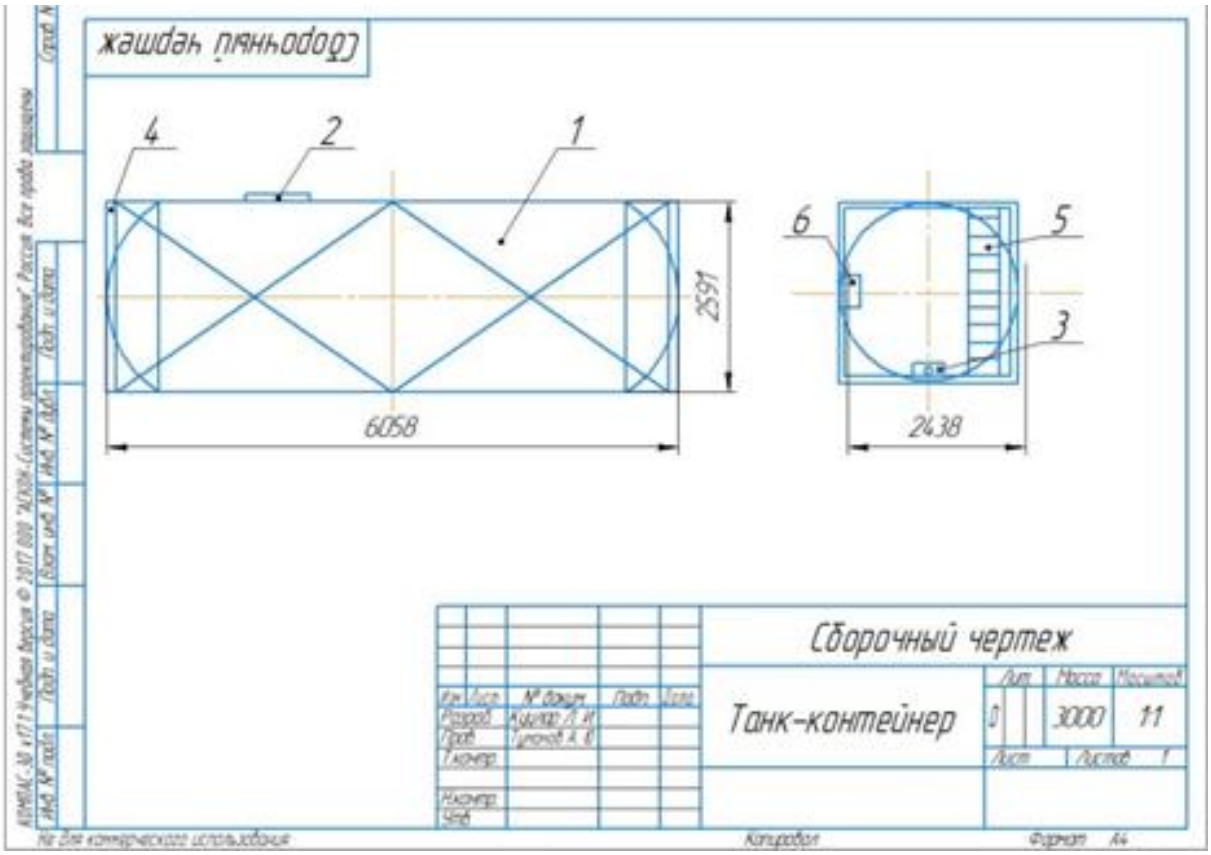

Рис. 6.4 - Унифицированный для МП танк-контейнер для ЖРО

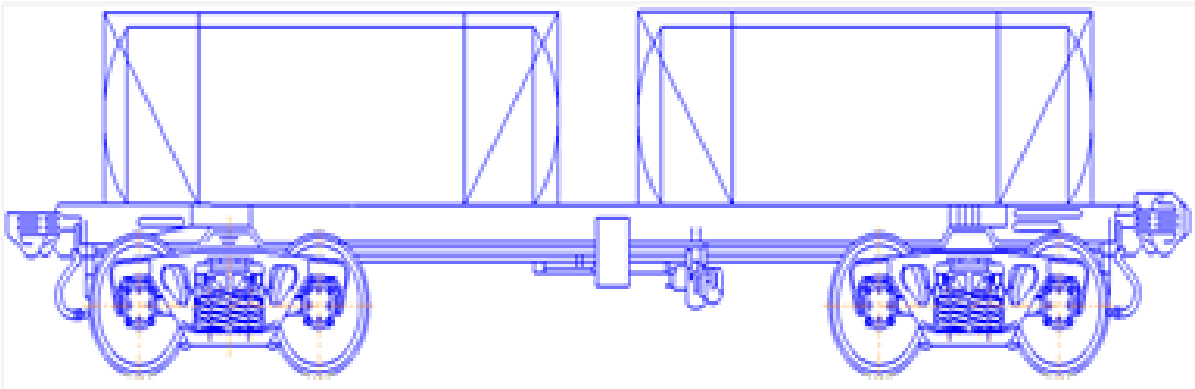

Рис. 6.5 - Расположение унифицированного танк-контейнера для ЖРО для МП на ж/д платформе

6.4 Математические модели эффективности мероприятий по предупреждению ЧС и повышению защищённости СХПЖРО

Ущерб, который мы оцениваем, может быть фактический, когда неблагоприятное событие *А* уже произошло и прогнозируемый, когда есть возможность предотвратить ТА. Существует методика оценки ущерба — обобщенная методика МЧС России (2004 г.) [94], которая позволяет оценить ущерб от ЧС. Можно охарактеризовать модель, заложенную в методику, как модель «Затраты». Положительной особенностью методики является возможность при отсутствии подтвержденных статистических данных приближенно оценить прямой и косвенный ущерб населению и территориям и затраты на ликвидацию последствий.

С точки зрения предотвращения ТА, как источника ЧС более важно уметь оценивать прогнозируемый ущерб, который в результате проведенных мероприятий может быть представлен как предотвращенный ущерб. В качестве допущения примем, что эффект от проводимых заблаговременно мероприятий по снижению риска ЧС равен величине предотвращенного этими мероприятиями ущерба. Запишем:

$$Э_м = W_П(A) = U_p \qquad (6.38)$$

Создание объекта, его эксплуатация проходит за определенное время, которое может исчисляться месяцами и годами. Согласно теории временной стоимости без определенных преобразований нельзя сравнивать вложения в ПОО, затраты на обеспечение безопасности и ущерб от аварий. В связи с этим, для корректного сопоставления элементов инвестиционных и текущих затрат с эффектами от мероприятий по предотвращению ЧС широко применяются математические методы дисконтирования денежных потоков в рамках теории временной стоимости денег [187]. Оценить чистый предотвращенный ущерб (*NPU)* можно в виде разности между затратами на предотвращение ЧС и суммой эффектов от фактически проведенных мероприятий по предотвращению ЧС по формулам с учетом дисконтирования денежных потоков, представленным в [94]. Автором выдвигается гипотеза о существовании зависимости между капитальными затратами на мероприятия Z_m и текущими затратами Z_t на обеспечение безопасности ПАТЭС и чистым предотвращенным ущербом *NPU.* Для подтверждения этой гипотезы предложена новая математическая модель «Затраты-эффект» с учетом фактора времени и на основание этой модели разработана методика оценки предотвращенного ущерба от ТА, как источника ЧС техногенного характера, которая в отличие от существующих, раскрывает зависимость между затратами на превентивные мероприятия, эффектами от них и предотвращенным ущербом, позволяет оценить эффективность мероприятий по предотвращению ЧС и получить интегральный показатель эффективности затрат на мероприятия — величину чистого предотвращенного ущерба.

Чистый предотвращенный ущерб в рамках предложенной модели можно оценить по формуле:

$$NPU = -Z_m + \sum_n^N \frac{\left(U_p - Z_t\right)}{(1+r)^n} \tag{6.39}$$

Приведем оценку чистого предотвращенного ущерба на примере радиационной аварии на ПАТЭС при пожаре в ЦПУ и взрыве кислородных баллонов, которые по сценарию приводят к повреждению судна и выхода РМ в окружающую среду.

Размер ущерба при аварии: U = 4 516 536 015,92 руб.

Размер ущерба после проведения мероприятий: U'=146 784 000 руб.

Затраты на проведение мероприятий, Z_m:

Z_m=6,43 % от U.

Размер предотвращенного ущерба в год, Up:

$$Up = \frac{U - U'}{12} \tag{6.40}$$

На рис. 6.6 приведен график чистого приведенного предотвращенного ущерба от времени.

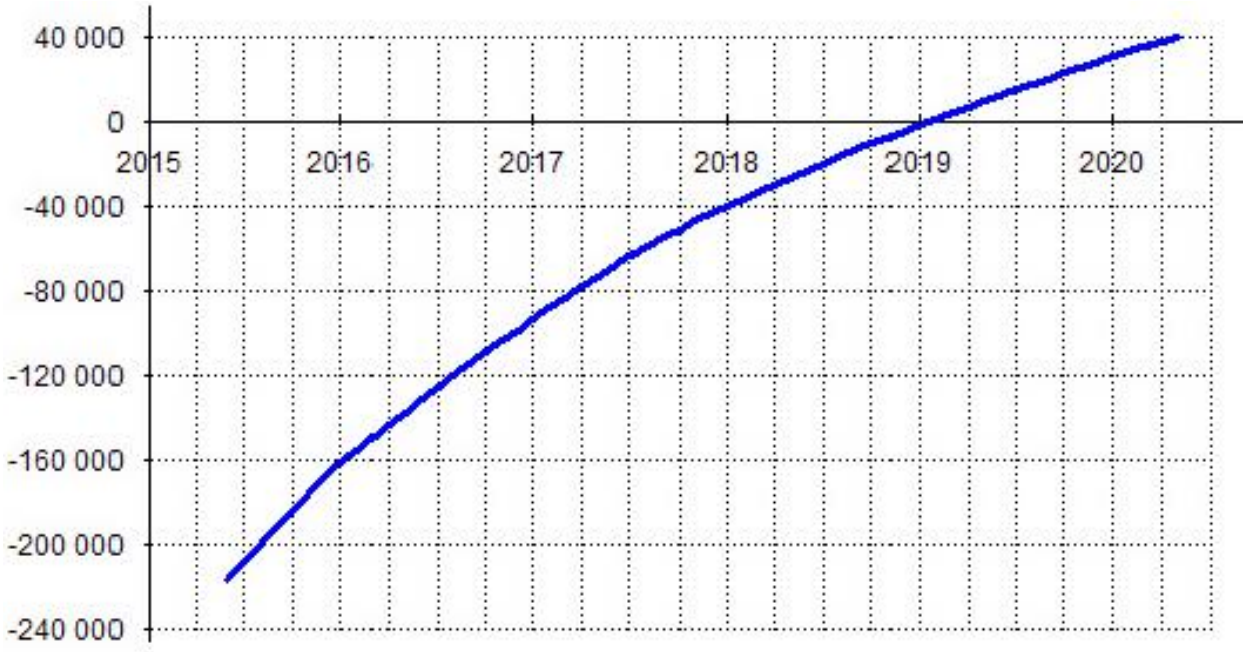

Рис. 6.6 - График чистого приведенного предотвращенного ущерба при Z_m = 6,43% от Up

Разработана усовершенствованная методика оценки эффективности мероприятий по повышению защищенности ПАТЭС, которая укрупненно

представляет собой упорядоченную совокупность следующих основных операций:

1. Оценка прогнозного ущерба от ЧС без учета предупредительных мероприятий.

2. Оценка нормативных и учет фактических затрат на проведение мероприятий по предупреждению ЧС

3. Оценка предотвращенного ущерба от ЧС

4. Оценка эффективности проведения мероприятий предупреждению ЧС по формуле *NPU*.

5. Интерпретация полученных результатов и предоставление руководителям ПАТЭС информации о прогнозном ущербе от ЧС.

Федеральная целевая программа «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года» предлагают целевой пороговый уровень затрат на мероприятия по повышению безопасности объектов на 2015 год: Z_m = 6,43% от *Up* [34]. Программа предполагает планомерное снижение норматива затрат на мероприятия по предотвращению ТА. По мнению экспертов необходимо достичь минимального уровня затрат, примерно: Z_m = 2–3% от *Up*.

На рис. 6.7 приведен график чистого приведенного предотвращенного ущерба от времени после проведения мероприятий по снижению опасности ТА.

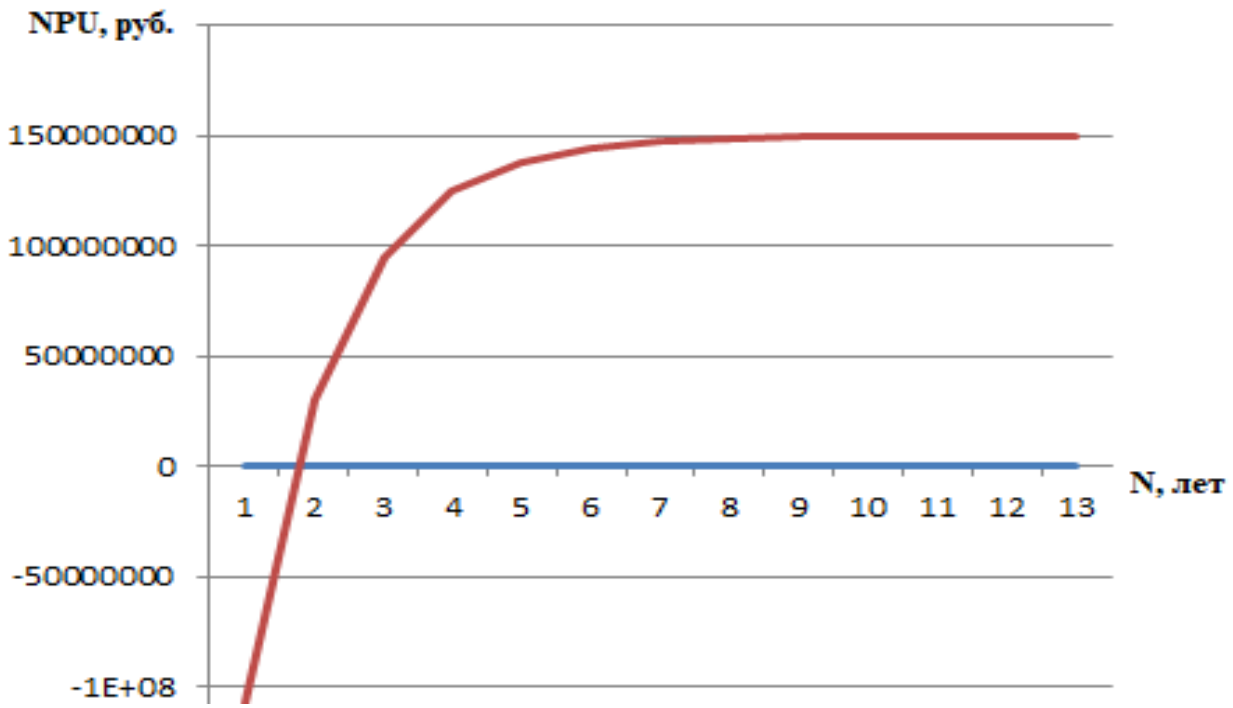

Рис. 6.7 - График чистого приведенного предотвращенного ущерба после проведения мероприятий по предупреждению ЧС

Пример оценки ущерба при радиационной аварии на ПАТЭС по представленной методике. Оценка проводится в соответствии с разработанной методикой. Рассчитаем показатель потерь трудовых ресурсов:

$$Y_2 = \frac{29400}{60.32} \cdot 30000 = 14622015.92\,руб.$$

Рассчитаем показатель затрат на оказание медицинской помощи:

$$Y_3 = 3000 \cdot (488 - 70) = 1254000\,руб.$$

Рассчитаем показатель потерь производственного фонда:

$$\Phi = \sum 0{,}5 \cdot 1 \cdot 4200 \cdot 738095{,}2 = 1550000000\ руб.$$

$$Y_4 = \Phi$$

Рассчитаем показатель затрат на проведение аварийно-спасательных работ:

$$ЗС = 0{,}00536 \cdot (1 + 0{,}273 \cdot 8) \cdot \frac{42000}{7} = 102$$

$$Y_5 = 50000 \cdot 102 = 5100000 \text{ руб.}$$

Рассчитаем показатель затрат на выплаты компенсаций пострадавшим в соответствии с Федеральным законом № 68 «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [40]. Затраты на выплаты включают в себя:

единовременная материальная помощь: 10 000 рублей на человека;

пострадавшим в результате ЧС: 200 000 – 400 000 рублей;

за погибших и умерших членов семей: по 1 000 000 рублей на каждого человека.

Тогда выплаты пострадавшим составляют:

$$Y_6=418\cdot410000+70\cdot1000000=241380000.$$

В соответствии с методикой рассчитаем показатель выплат за экологический ущерб:

$$Y_7 = 2700000000.$$

Рассчитаем показатель затрат на эвакуацию и размещение пострадавшего населения:

$$Y_8= H_2\cdot Z_1,$$

$$Y_8 = 10000\cdot418 = 4180000$$

Итого полный ущерб от ЧС техногенного характера по составил:

$$Y= Y_1+Y_2+Y_3+Y_4+Y_5+Y_6+Y_7+Y_8$$

$$Y=4\ 516\ 536\ 015{,}92 \text{ руб.}$$

Из приведенных расчетов видно, что в результате аварии по самому опасному сценарию на ПАТЭС, ущерб составляет величину более четырёх с половиной миллиардов рублей в ценах 2019 года. Очевидно, что для того, чтобы избежать прогнозируемых потерь, необходимо предпринять предупреждающие меры по обеспечению защиты конструкций атомного морского судна. В качестве превентивных технических мероприятий предлагается в проекте ПАТЭС предусмотреть перемещение отсека с кислородными баллонами на безопасное расстояние в центр палубы — 15 м от борта.

Далее согласно методике произведем повторную оценку ущерба после проведения данных мероприятий. Оценка ущерба после проведения превентивных мероприятий. Оценка последствий при взрыве кислородных баллонов показывает, что радиационной аварии в этом случае не происходит. Возможны жертвы от ВУВ и разлета осколков. В зону разлета осколков попадает 1 человек исходя из плотности распределения персонала по ПАТЭС:

$$508{,}68 \cdot 0{,}002 = 1$$

Радиационного заражения не происходит, избыточное давление во фронте ударной волны в районе ЛБ составит 19,8 Кпа, что значительно меньше порогового значения в 50 Кпа, будут разрушены только внутренние перегородки. В этом случае величина полного ущерба определяется по следующим показателям:

Показатель потерь производственного фонда:

Y_4=145584000 – стоимость капитального ремонта

Показатель затрат на проведение аварийно-спасательных работ:

$$ЗС = 0{,}00536 \cdot (1 + 0{,}273 \cdot 8) \cdot \frac{1526{,}04}{7} = 4$$

$$Y_5 = 4 \cdot 50000 = 200000$$

$$Y_6 = 1000000$$

Полный ущерб от аварии с учетом проведенных превентивных мероприятий:

Y'=146 784 000 руб.

Расчет предотвращенного ущерба

Расчет *NPU* проводится на срок 12 лет. Это определяется плановым сроком работы ПАТЭС без перегрузки РАО. Сумма первоначальных инвестиций определяется исходя из Федеральной целевой программы по снижению риска [31]. В данной программе установлено ограничение на затраты на превентивные мероприятия. Предельные затраты на обеспечение

безопасности не должны превышать 6.43% от предотвращенного ущерба. Ставка дисконтирования–0,47 (рассчитана по формуле ставки дисконтирования с учетом поправок на риск).

Затраты на проведение превентивных мероприятий, IC, руб.:

$$IC = 6{,}43\ \%\ \text{от}\ Y = 290\ 413\ 266$$

Эффект от проведения превентивных мероприятий, CF, руб.:

$$CF = \frac{Y}{12} = 376378001{,}3$$

Расчет *NPU* проведен с помощью программы Microsoft Excel. Подробные результаты расчета в программе представлены в работе.

Основные результаты расчета чистого приведенного предотвращенного ущерба за 12 лет эксплуатации представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Результаты расчета NPU

Период (год)	Затраты на проведение превентивных мероприятий, IC (руб.)	Эффект от проведения превентивных мероприятий, CF (руб.)	Дисконтированный денежный поток (руб.)	NPU (руб.)
0	-290 413 266	-290 413 266	-290413266	-197 560 044,90
1		376 378 001,3	256039456,7	-79 072 629,15
2		376 378 001,3	174176501,1	-24 240 190,93
3		376 378 001,3	118487415,7	1 134 624,29
4		376 378 001,3	80603684,18	12 877 331,14
5		376 378 001,3	54832438,22	18 311 505,25
6		376 378 001,3	37300978,38	20 826 278,78
7		376 378 001,3	25374815,22	21 990 040,88
8		376 378 001,3	17261779,06	22 528 595,24
9		376 378 001,3	11742706,85	22 777 822,11
10		376 378 001,3	7988235,95	22 893 156,87
11		376 378 001,3	5434174,116	22 946 530,35
12		376 378 001,3	3696717,085	22 971 230,00

Исходя из результатов расчета, полный ущерб от воздействия техногенной аварии на объекте составляет до проведения мероприятий более четырех миллиардов рублей. Методика оценки косвенных эффектов от проведения превентивных мероприятий позволяет оценить эффективность

проведения мероприятий по снижению риска. Таким образом, целесообразнее затратить минимально необходимые средства на предупреждение последствий, чтобы свести к минимуму возможный ущерб от чрезвычайных ситуаций.

Оценка чистого предотвращённого ущерба проводилась с применением ППП «Excel 2010» (рис. 6.8)

Инвестиции	-164212942												
Операционные доходы													
Операционные расходы													
Чистый денеж.поток	-290413266	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378001,3	376378
Период, лет	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	
Годовая ставка дисконтирования	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	
Коэфициент дисконтирования	1	0,680272109	0,462770142	0,31480962	0,214156204	0,145684493	0,099105097	0,067418433	0,04586288	0,031199238	0,021223971	0,014438076	0,009
Дисконтированный денежный поток	-290413266	256039456,7	174176501,1	118487415,7	80603684,18	54832438,22	37300978,38	25374815,22	17261779,06	11742706,85	7988235,95	5434174,116	369671
NPU	**-197 560 044,90 ?**	**-79 072 629,15 ?**	**-24 240 190,93 ?**	**1 134 624,29 ?**	**12 877 331,14 ?**	**18 311 505,25 ?**	**20 826 278,78 ?**	**21 990 040,88 ?**	**22 528 595,24 ?**	**22 777 822,11 ?**	**22 893 156,87 ?**	**22 946 530,35 ?**	**22 971 2**
NPU итог	**22 971 230,00 ?**												

Примечания:

Ущерб от радиационной аварии	4 516 536 015,92
Затраты на превентивные мероприятия (6.43% от ущерба)	290 413 266
Эффекты за 12 лет	376378001,3
Ставка дисконтирования	0,47
Годовая ставка дисконтирования	1,47
Ущерб после проведения превент.меропр.	146 784 000

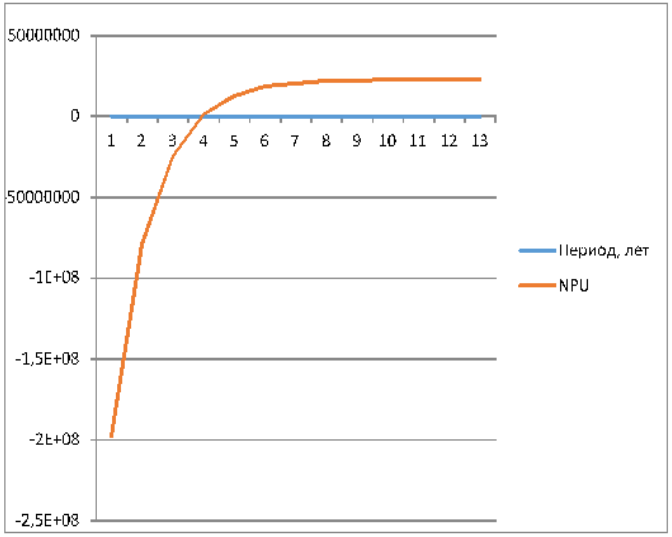

Рис. 6.8 - Оценка чистого предотвращённого ущерба с применением ППП «Excel 2010»

6.5 Выводы по главе 6

В отличие от существующих, разработанные математические модели защищенности объектов и их элементов раскрывают зависимость между защитной способностью объекта, уровнем ПФ источника ЧС и параметрами состояния объекта и позволяют учитывать конструктивно-технические и эксплуатационно-технические факторы, влияющие на ее уровень.

Разработаны технические мероприятия, которые направлены на предупреждение ТА, как источника ЧС, которые предусматривают:

проектирование помещений для хранения газовых баллонов на ПАТЭС с учетом эффектов воздействия ПФ источников ЧС;

проектирование унифицированного модуля-цистерны для МП РМ горизонтального типа, который может выполнять различные задачи, такие как транспортирование широкого спектра жидких радиоактивных отходов различными видами транспорта с возможностью безопасной перегрузки, с учетом не только существующих норм для расчета и проектирования вагонов-цистерн, но и с учетом эффектов воздействия ПФ источников ЧС на ПАТЭС.

Разработанная математическая модель оценки эффективности мероприятий, раскрывает зависимость между совокупными затратами на проведение мероприятий по предупреждению ЧС техногенного характера и предотвращенным ущербом от воздействия ПФ источников ЧС, и позволяют обоснованно распределять ограниченные ресурсы для поддержания приемлемого уровня защищенности объекта.

Проведен вычислительный эксперимент и прогон предложенной математической модели оценки предотвращенного ущерба ЧС ПАТЭС с применением ППП «Excel 2010», а дальнейшее исследование эффективности мероприятий предусматривает определение и снижение обоснованных пороговых значений предельных затрат на обеспечение безопасности в процентном отношении к величине предотвращенного ущерба от ЧС, а также

разработка предложений методических рекомендаций по мероприятиям по снижению ущерба от действия ПФ источников ЧС на ПОО, которые основаны на управлении базовым параметром защищённости с целью снижения опасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе методов теории вероятностей, математической статистики решен комплекс научных задач, заключающихся в разработке методов оценки изолированного и комбинированного действия физических ПФ источников ЧС при ТА при транспортировании РМ в МП. основывающихся на физических и математических моделях воздействия физических ПФ, учитывающих особенности ПОО, что позволяет обоснованно подходить к совершенствованию защищенности СХПЖРО, имеющих важное социальное и хозяйственное значение.

Обобщая данные теоретических и экспериментальных исследований, можно заключить, что корректность разработанных методов описания действия ПФ источников ЧС на СХПЖРО подтверждена не только теоретически, но и экспериментально.

В работе решена проблема обоснования научно-методического аппарата оценки защищенности средств хранения и перевозки ЖРО на ПАТЭС при МП в условиях воздействия ПФ источников ЧС и формирования требований по обеспечению их стойкости при различных вариантах использования средств и способов защиты.

Разработанная математическая модель эффективности мероприятий, раскрывает зависимость между совокупными затратами на проведение мероприятий по предупреждению ЧС техногенного характера и прогнозным предотвращенным ущербом от воздействия ПФ источников ЧС, и позволяют обоснованно распределять ограниченные ресурсы для поддержания приемлемого уровня защищенности ПОО.

Дальнейшие перспективы разработки темы заключаются в теоретическом описании развития во времени эффектов воздействия при изолированном или комбинированном действии ПФ источников ЧС на объекты и объединяются единым термином: временные характеристики воздействия поражающих факторов. В качестве временных характеристик

можно рассматривать: время проявления заданных эффектов после воздействия ПФ; продолжительность сохранения эффектов воздействия; общее время с момента воздействия ПФ до исчезновения рассматриваемых эффектов. Также актуальны исследования в области теоретических основ повышения устойчивости функционирования критически важных и потенциально опасных объектов в условиях чрезвычайных ситуаций.

Решение данных проблем является ключевым направлением дальнейших научных исследований в обеспечении безопасности и защите населения и территорий от ЧС техногенного характера.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АДГ— аварийный дизель генератор

АТЭС ММ — атомная теплоэлектростанция малой мощности

АЭС — атомная электростанция

ВВ — взрывчатое вещество

ВКУ— вспомогательная котельная установка

ГВС — газовоздушная среда

ГПП — главная противопожарная переборка

ГРЩ — главный распределительный щит

ИС — инициирующее событие

ЖРО — жидкие радиоактивные отходы

ЖЦП — жизненный цикл проекта;

ЗАТО —закрытое административно-территориальное образование

ЗО — защищаемый объект

ЗО — защитное ограждение

ИУС — измерительное устройство скорости

КВО — критически важный объект

КЗВ — координатный закон воздействия

ЛБ — левый борт

ЛУР — лицо, управляющее риском

МП — мультимодальные перевозки

МРЗ — максимальное расчетное землетрясение

МЧС — министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

НД — нормативная документация

НДС — напряженно-деформированное состояние

НТВС — новая тепловыделяющая сборка

ОИАЭ — объект использования атомной энергии

ООБ — отчет по обоснованию безопасности

ОМП — оружие массового поражения

ОТВС — облученная тепловыделяющая сборка

ОУ — опреснительная установка

ПАР — пост аварийного расхолаживания

ПАТЭС — плавучая атомная теплоэлектростанция

ПБ — правый борт

ПГ — парогенератор

ПОО — потенциально опасные объекты

ПМУ — пневматическое метательное устройство

ППП — пакет прикладных программ

ПСД — причинно-следственная диаграмма;

ПТУ — паротурбинная установка

ПУ — приемное устройство

ПФ — поражающий фактор

ПЭБ — плавучий энергоблок

РАО — радиоактивные отходы

РДГ — резервный дизель генератор

РМ — радиоактивные материалы

РМРС — российский морской регистр судоходства

РО — регулирующий орган

РУ — реакторная установка

САОЗ — система аварийного охлаждения активной зоны

САР — система аварийного расхолаживания

СБ — система безопасности

ССАД — система снижения аварийного давления

СУЗ — система управления и защиты

СХПЖРО — средства хранения и перевозки жидких радиоактивных отходов

ТА — техногенная авария

ТВС — тепловыделяющая сборка

ТНТ — тринитротолуол

ТРО — твердые радиоактивные отходы

УОИ — устройство обработки информации

УРП — управляющий риском проекта

УСБ — управляющая система безопасности

ГУ ФИПС — федеральный институт промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентным и товарным знакам

ФЗВ — факторный закон воздействия

ЦАР — цистерна аварийного расхолаживания

ЦПУ — центральный пост управления

ЧС — чрезвычайная ситуация

ЩРУ — щит реакторной установки

ЭФР — эмпирическая функция распределения

ЯТ — ядерное топливо

ЯЭУ — ядерная энергетическая установка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ МЧС РФ от 28 февраля 2003 г. N 105 "Об утверждении Требований по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения".

2. Федеральный закон от 8 марта 2015 г. N 38-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера".

3. ГОСТ Р 22.0.02-94 (Изменение №1, принято 31.05.2000, № 148-ст).

4. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

5. Тихонов М.Н., Рылов М.И. Ядерно-радиационное наследие на Северо-Западе России: проблемы, пути решения, роль общественности // Экологическая экспертиза: Обзорная информация, 2008, №7.

6. Атомная энергия [Электронный ресурс]. – URL: http://www.atomic-energy.ru/articles/2013/04/05/40983 (дата обращения 16.02.2019 г.).

7. АО «ОКБМ Африкантов» КЛТ-40С Реакторные установки КЛТ-40С для атомных станций малой мощности [Электронный ресурс]. – URL: http://www.okbm.nnov.ru (дата обращения 12.10.2018 г.).

8. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ (с изменениями на 27.12.2018 г.).

9. Гребенюк Л.А., Васильев И.В., Поверинов С.И., / Методика выявления и оценки радиационной обстановки при разрушении (аварии) атомных электростанций //: методич. пособие. Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2010. – 16 с.

10. ГОСТ Р 56275-2014 Менеджмент рисков. Руководство по надлежащей практике менеджмента рисков проектов.

11. Деловой журнал «Neftegaz.RU» // [Электронный ресурс]. – URL: https://neftegaz.ru/news/view/116834-Plavuchaya-AES-Akademik-Lomonosov-vstanet-na-yakor-na-Chukotke (дата обращения 06.03.2019 г.).

12. Зобнина Н.А., Зотова Л.Ю. Туманов А.Ю., / «Оценка предотвращенного ущерба при радиационной аварии на ПАТЭС» // Неделя науки СПбСТУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Высшая школа техносферной безопасности. – СПб : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – 154 с.

13. Зобнина Н.А., Туманов А.Ю., Хлобыстин Н.С., / «Методика оценки предотвращенного ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера на энергонасыщенных объектах» // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, 19-21 апреля 2018 г. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 292 с.

14. Информационно-аналитический сайт, посвящённый атомной энергетике в России и мире [Электронный ресурс].

15. http://www.atominfo.ru/news/air1632.htm (дата обращения 02.02.2019 г.).

16. Информационный центр «Aftershock» [Электронный ресурс]. – URL: https://aftershock.news/?q=node/604236&full (дата обращения 17.02.2019 г.).

17. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию плавучего энергоблока плавучей атомной теплоэлектростанции в г.Певеке чукотского автономного округа (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) Том 1: Текстовая честь // М: ООО «НПК «МорТрансНиИПроект», 2017. – 82 с.

18. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию плавучего энергоблока плавучей атомной теплоэлектростанции в г.Певеке Чукотского автономного округа (включая материалы оценки воздействия на

окружающую среду) Том 3: Оценка воздействия на окружающую среду // М: ООО «НПК «МорТрансНиИПроект», 2017. – 124 с.

19. Методическое пособие по оценке радиационной, химической обстановки». Москва 1988 г.

20. Никитин А., Андреев Л., /Доклад объединения Bellona. Плавучие атомные станции [Электронный ресурс]. – URL: http://bellona.ru/assets/sites/4/2015/06/fil_Floating-npps-ru1.pdf (дата обращения 10.10.2018 г.).

21. НП-023-2000. Требования к отчету по обоснованию безопасности ядерных энергетических установок судов. Госатомнадзор России, Москва, 2000 г.

22. НП-064-05 «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационные опасные объекты» (утратил силу с 15.01.2018 г.).

23. Официальный сайт администрации «Водный транспорт» [Электронный ресурс]. – URL: http://fleetphoto.ru/vessel/30708/ (дата обращения 17.02.2019 г.).

24. Официальный сайт АО «Концерн Росэнергоатом» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.rosenergoatom.ru (дата обращения 22.01.2019 г.)

25. Официальный сайт Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rosatom.ru/ (дата обращения 06.03.2019 г.).

26. Официальный сайт Комитета по науке и высшей школе [Электронный ресурс]. – URL: http://knvsh.gov.spb.ru/ (дата обращения 15.11.2018 г.).

27. Официальный сайт общественной организации «Greenpeace» [Электронный ресурс]. – URL: https://greenpeace.ru (дата обращения 16.02.2019 г.).

28. Петров Э.Л., / О коммерческих приоритетах ПАТЭС // Научный

журнал № 16, 03.04.2005 г., «Атомная стратегия».

29. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 17.05.2001 N 14 «О введении в действие санитарных правил» (вместе с "СанПиН 2.1.6.1032-01. 2.1.6. Атмосферный воздух и воздух закрытых помещений, санитарная охрана воздуха. Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы").

30. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 N 165 «Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» (с изменениями на 31.05.2018).

31. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 N 40 «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» (ред. от 16.09.2013).

32. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.04.2003 N 69 «О введении в действие Санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.6.1.24-03 «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций».

33. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.10.2003 N 158 «О введении в действие Санитарных правил СП 2.6.1.45-03 "Обеспечение радиационной безопасности при проектировании, строительстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации атомных теплоэлектростанций малой мощности на базе плавучего энергетического блока СП АТЭС-2003».

34. Постановление Правительства РФ от 07.07.2011 N 555 «О федеральной целевой программе «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

в Российской Федерации до 2015 года» (ред. от 25.04.2015).

35. Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 N 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» (ред. от 04.02.2015).

36. Постановление Правительства РФ от 30.12.2003 N 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (ред. от 29.11.2018).

37. ПОТ РО 14000-005-98. Положение. Работы с повышенной опасностью.

38. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями на 12.10.2018 г.).

39. Приказ Ростехнадзора от 11.04.2016 N 144 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах».

40. Приказ Ростехнадзора от 17.12.2015 N 522 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций».

41. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 18.10.2010 г. N 1801-р «Об установлении границ морского порта Певек (Чукотский автономный округ)».

42. Расчетная оценка воздействия взрывного разрушения баллонов высокого на корпусные конструкции ПЭБ АТЭС пр.20870. ЦНИИ им.акад. А.Н. Крылова, вып. № 38870, 1997.

43. Расчетная оценка воздействия внешних воздушных взрывов и землетрясений на корпусные конструкции ПЭБ АТЭС пр 20870 ЦНИИ им.акад. А.Н. Крылова, вып. 38871, 1997.

44. Руководство РБ Г-05-039-96 «Руководства по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия».

45. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.

46. Сетевое издание Sudostroenie.info [Электронный ресурс]. – URL: http://sudostroenie.info/novosti/18127.html (дата обращения 16.02.2019 г.).

47. Туманов А. Ю. Модели и методы оценки экономической эффективности интегрированных систем безопасности. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 104 с.

48. Федеральный закон от 09.01.1996 N 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» (ред. от 19.07.2011).

49. Федеральный закон от 21.12.1994 N 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (ред. от 23.06.2016).

50. Федеральный закон от 28.06.2014 N 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» (вместо ФЗ 115 «О государственном прогнозировании») (ред. от 31.12.2017).

51. Яковлев В.В., / Риск в природно-технической среде // Монография. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015г. – 507 с.

52. Burns B.M., / «Quo Vadis: Where Goes the Army Reactor Program?» // NBC Report, United States Army Nuclear and Chemical Agency, Fall-Winter 2004, pp.69-70.

53. Gardner C. / «STURGIS decommissioning hits major milestone with deactivated nuclear Reactor Pressure Vessel removal» // «Chesapeake Engineer Magazine» 2017, June 21, 2017, pp. 15-17.

54. INES Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий – Вена: МАГАТЭ, 2010. – 235 с.;

55. Kramer A.E. / «The Nuclear Power Plant of the Future May Be Floating Near Russia»// American daily newspaper «The New York Times» 2018, 26.08. 2018, pp.38-41.

56. U.S. Army Corps of Engineers / «FINAL Environmental Assessment Decommissioning and Dismantling of STURGIS and MH-1A» // [Electronic resource].

57. https://www.nab.usace.army.mil/Portals/63/docs/Environmental/HealthPhysics/STURGIS%20Final%20EA%2020140124.pdf (date of treatment 21.02.2019).

58. «Безопасность ядерного оружейного комплекса и атомной отрасли: статьи, выступления, размышления и суждения», Москва, 2003 г., С. 297-300.

59. «Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2010 года и дальнейшую перспективу» от 04.12.2003 № Пр-2191.

60. «Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» от 01.03.2012 № Пр-539.

61. 20870.360060.089РР. Расчет неспецификационных случаев затопления. ОАО «ЦКБ «Айсберг».

62. 20870.360060.169РР. Расчет непотопляемости. ОАО «ЦКБ «Айсберг».

63. 20870.360061.081РР. Определение областей разрушения при взрыве баллонов высокого давления. ОАО «ЦКБ «Айсберг».

64. http://teachprog.narod.ru/program/predmet/Mathematica/book/ MathCAD12/ Glava_09/ Index16.htm.

65. IAEA, Definition and Recommendations for the Prevention of Marine

Pollution by Dumping of Wastes and other Matter, 1972-1986 Edition, Safety Series № 78, IAEA, Vienna, 1986.

66. Radiological conditions of the Western Kara Sea; assessment of the radiological impact of the dumping of radioactive waste in the Arctic seas, report on the International Arctic Seas Assessment Project (IASAP). — Vienna: International Atomic Energy Energy, 1998.

67. Risk Spectrum Professional. Руководство пользователя. // Техническая документация к программному комплексу фирмы By Relcon AB.– 119 с.

68. Risk Spectrum. Руководство по теории. // Техническая документация к программному комплексу фирмы By Relcon AB.– 58с.

69. А.Б. Нестеров Исследование эффективности конструктивной бортовой защиты при аварийном столкновении судов. «Вопросы судостроения», серия: Проектирование судов, выпуск 40, Л., 1984 г.

70. А.Ю. Туманов. Концептуальные модели базы данных опасных объектов, источников опасности и факторов риска информационно-управленческой системы прогнозирования техногенных и природных катастроф в энергетике. Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы Международной конференции. 17-18 февраля 2011 года, СПб, Т.3 – Изд-во Политехн. Ун-та. – 2011. – С.139-146.

71. Анализ аварийных ситуаций, связанных с внешними воздействиями на ПЭБ пр.20870 и оценка их радиационных последствий. ЦНИИ им.акад. А.Н. Крылова, вып. № 39096, 1997 г.

72. Анализ безопасности установок и технологий. Методическое пособие по проблемам регулирования риска. Часть 3. под ред. Петрина С.В., Саров, ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006 г.

73. Анализ неспецификационных случаев затопления плавучего энергетического блока по проекту 20870 (ПЭБ) и адаптированное

программное обеспечение для выполнения расчетов по теории корабля. ЦНИИ им.акад. А.Н. Крылова, вып. № 39051, 1997 г.

74. Анализ последствий внешних воздействий в части реакторной установки. (Исходные данные для разработки части 3 раздела 15 ООБ) ОАО «ОКБМ Африкантов», 2010.

75. Анализ происшествий с ПЭБ пр. 20870 обусловленных внешних исходными событиями. Итоговый отчет. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып. № 45771, 2011 г.

76. Атомная теплоэлектростанция малой мощности на базе плавучего блока проекта 20870 с реакторными КЛТ-40С в г. Вилючинск. Обоснование площадки для размещения АТЭС ММ в г. Вилючинск, Атомэнерго, 2008 г.

77. Атомная теплоэлектростанция малой мощности на базе плавучего энергоблока проекта 20870 с реакторными установками КЛТ-40С в г. Вилючинск Камчатской области. Обоснование инвестиций, 2004 г.

78. Басенко В.Г., Туманов А.Ю. Методы оценки риска сложных социо-технических систем на примере проекта создания плавучих атомных станций. Проблемы управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях. Тезисы научно-практической конференции. СПб.– 2010.–С. 101-103.

79. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Человеческий фактор в проблемах безопасности. / Рук. Авт. Кол-ва Н.А. Махутов. — М.: МГФ «Знание». 2008. 688 с.

80. Белов П.Г. Моделирование опасных процессов в техносфере. Москва: Издательство Академии гражданской защиты МЧС РФ. 1999. 124 с.

81. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере – М.: Издательский центр «Академия». – 2003. – 512 с.

82. Борисов Ю.Б., Маматказин С.В., Никифоров Г.Л., Положенцева

Л.Б. Конструктивные мероприятия на судах повышенного экологического риска, обеспечивающие локализацию последствий взрывных аварий во внутренних помещениях для уменьшения ущерба, наносимого окружающей среде. Труды второй международной конференции по судостроению ISC'98, секция С, Санкт-Петербург, 1998 г.

83. Будущее прикладной математики: Лекции для молодых исследователей. От идей к технологиям / Под ред. Г.Г.Малинецкого. – М.: КомКнига, 2008. – 512 с.

84. Взрывные явления. Оценка и последствия. В 2-х кн. Пер. с англ. под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е.Гельфанда. М.: Мир, 1986 г.

85. Владимиров В. И. Физика ядерных реакторов. М.: Либроком, 2008 г.

86. Выбор и обоснование конструктивно-компановочной схемы системы затопления ЗО РУ КЛТ-40С ПЭБ проекта 20870. Технический отчет ЦНИИ им.акад. А.Н.Крылова, вып.№17309, 1997 г.

87. Ганул М.Н., Кучин Н.Л., Сергеев И.В., Кузнецов Ю.В., Легин В.К. О контрольных концентрациях техногенных радионуклидов в морской воде. – Экологическая химия, вып. 8 (3), 1999 г.

88. ГОСТ 14249-80 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность».

89. ГОСТ Р 51344-99 «Безопасность машин. Принципы оценки и определения риска».

90. Декларация о намерениях строительства АСММ на базе плавучего энергоблока с реакторными установками типа КЛТ-40С в районе закрытого административно-территориального образования город Вилючинск Камчатской области, 1999.

91. Дмитриев В. И. Обеспечение живучести судов и предотвращение загрязнения окружающей среды. М.: Моркнига, 2010.

92. Доллежаль Н. А. и др. Ядерные энергетические установки. М.:

Энергоатомиздат, 1990 г.

93. Дульнев А.И. Прочность и сотрясение судовых конструкций в условиях аварийного падения вертолета на палубу. Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып. 21(305), 2005 г.

94. Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004г.

95. Завьялов С. Н. Плавучие атомные теплоэлектростанции, состояние проекта (доклад). М., 2010 г.

96. Короткин А.И. Присоединённые массы судостроительных конструкций. Справочник. − СПб, Мор Вест, 2007 г.

97. Коротков М. В. Перезарядка корабельных ядерных реакторов. М.: Военное издательство, 1991.

98. Кузнецов В. А. Судовые ядерные реакторы. Л.: Судостроение, 1988 г.

99. В.В. Кулямин. Методы верификации программного обеспечения. Институт системного программирования РАН.

100. Малик Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. – М: Наука. – 2005.

101. Методические рекомендации по расчёту прочности защитных оболочек и конструктивной защиты ЯЭУ. – Отчёт ЦНИИ им.акад. А.Н. Крылова вып. 20831, Л., 1982.

102. Можаев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной научной школы: "Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах" (МА БРК – 2001). СПб.: ООО "НПО Омега".– 2001.– С.56–61.

103. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика, ч.1. М:

Наука, 1965 г.

104. Н.И.Юсупова, Г. Р.Шахаметова, К. Р. Еникееева. Модели представления знаний для идентификации опасностей промышленного объекта. Вестник УГАТУ, №1 (28). – С. 91–100.

105. Н.Н. Волков, С.Б. Кодацкий. Конструктивные особенности атомных судов. Л.: Судостроение, 1971.

106. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523–09.

107. НП-022-2000. Общие положения обеспечения безопасности ЯЭУ судов.

108. НП-023-2000. Требования к отчету по обоснованию безопасности ядерных энергетических установок судов. Госатомнадзор России, Москва, 2000.

109. НП-064-05 Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационные опасные объекты. Госатомнадзор России, Москва, 2005 г.

110. О безопасности: Федеральный закон от 28 декабря 2010 г. // Российская газета. 2010 г.

111. Обеспечение безопасности ПЭБ в аварийных ситуациях (столкновение судов и посадка на мель) за счет регламентации размеров корпусных конструкций. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып. № 38850, 1997 г.

112. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Л:Гидрометеоиздат, 1986 г.

113. Океанографическая энциклопедия (пер. с англ.). Л: Гидрометеоиздат, 1974 г.

114. Оценка защищённости оборудования 1-ой категории расчетными методами. НПСФ «Ост-Сейсм», 2000 г.

115. Оценка защищённости оборудования ПЭБ при особых

воздействиях. Отчёт НПСФ ″ОСТ-Сейсм″ - НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ, С. Петербург, 2000 г.

116. Письмо ОАО «ОКБМ АФРИКАНТОВ» от 31.08.10 исх. № 48/1-кт150.

117. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Энергоатомиздат, М., 1989 г.

118. Попов Ю.Н., Фаддеев О.В., Тряскин Д.Я., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах. – Л., «Судостроение», 1967.

119. Постановление Правительства Российской Федерации от 21.05.2007 г. № 304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

120. Постановление Правительства РФ 1998 года о передаче работ по комплексной утилизации АПЛ Минатому России и создание предприятий по обращению с РАО СевРАО и ДальРАО.

121. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург. 2004 г.

122. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2005 г.

123. http://www.beintrend.ru/2010-09-06-06-39-10. (с экрана, доступ 15.03.2016).

124. Правила Российского морского регистра судоходства. НД № 2-020101-052 – Правила классификации и постройки морских судов. М., 2008.

125. Приказ Ростехнадзора от 11.04.2016 N 144 "Об утверждении Руководства по безопасности "Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах".

126. Причинная обусловленность характеристик коррозионных разрушений листовых элементов обшивки в средней подводной части судов.

Бугакова Н.Ю., Гольденберг И.З., Кордас Т.В. Эксплуатация морского транспорта. 2009. № 1. С. 54-62.

127. Программный комплекс Risk Spectrum вероятностного анализа надежности и безопасности систем. Разработан Шведской фирмой Relcon AB. Форма исходной структурной схемы системы – дерево отказов. Данные получены из Internet, сайт http://www.riskspectrum.com.

128. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611099 об официальной регистрации программ. Авторы и правообладатели: Можаев А.С., Гладкова И.А. М.: Роспатент РФ. – 2003.

129. Разработка материалов для ООБ ЯЭУ ПЭБ пр. 20870.НПСФ «ОСТ-Сейсм», 2010.

130. Разработка рекомендаций по определению размеров конструкций, подверженных воздействию ледовых нагрузок и швартующихся судов. Научно-технический отчёт, вып. 36632, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, С. Петербург, 1997 г.

131. Разработка рекомендаций по системе раскрепления ПЭБ с учетом внешних воздействий. НПСФ «ОСТ Сейсм», 2010 г.

132. Расчёт общей продольной прочности по правилам РМРС 2005г. 20870.360061.142РР, ОАО «ЦКБ «Айсберг».

133. Расчетная оценка воздействия взрывного разрушения баллонов высокого на корпусные конструкции ПЭБ АТЭС пр.20870. ЦНИИ им.акад. А.Н. Крылова, вып. № 38870, 1997.

134. Расчетная оценка воздействия внешних воздушных взрывов и землетрясений на корпусные конструкции ПЭБ АТЭС пр 20870 ЦНИИ им.акад. А.Н. Крылова, вып. 38871, 1997.

135. Расчетная оценка объемов повреждений корпуса ПЭБ при ударе о грунт в следствии аварийного затопления. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова,

вып. № 38906, 1997 г.

136. Расчётная оценка сотрясений ПЭБ пр. 20870 при падении на него вертолёта, действии подводных, диверсионных взрывов и аварийных взрывов на танкере снабжения. Отчёт ЗОА ″Морская техника″, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, С. Петербург, 2000 г.

137. Расчетно-экспериментальная оценка поведения аварийного ПЭБ проекта 20870 при погружении, вызванном поступлением воды внутрь его корпуса. Технический отчет вып. 39057, ЦНИИ им.акад. А.Н.Крылова, С-Петербург, 1997 г.

138. Расчетный прогноз изменений коррозионных разрушений подводной наружной обшивки судна после увеличения ее толщины в «слабых местах» Бугакова Н.Ю., Гольденберг И.З. Эксплуатация морского транспорта. 2009. № 4. С. 52-59.

139. Реактор плавающего энергоблока (ПЭБ) (http://www.reactors.narod.ru/index.htm).

140. Регистр СССР. Нормы прочности морских судов. – Л., 1991

141. Россия приступила к строительству плавучих атомных электростанций (http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2508).

142. Руководство РБ Г- 05- 039-96 «Руководства по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия»

143. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. М., Энергоатомиздат, 1989 г.

144. Саркисов А. А., Пучков В. Н. Физические основы эксплуатации ядерных паропроизводящих установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.

145. Справочник по живучести корабля / В. А. Якимов и др. М.: Военное издательство, 1984.

146. Стандарты по верификации и валидации ПО.ISO/IEC 9126-1 Software engineering — Product quality — Part 1: Quality model. Geneva,

Switzerland: ISO, 2001., ISO/IEC TR 9126-2 Software engineering — Product quality – Part 2: External metrics. Geneva, Switzerland: ISO, 2003., ISO/IEC TR 9126-3 Software engineering — Product quality — Part 3: Internal metrics. Geneva, Switzerland: ISO, 2003., ISO/IEC TR 9126-4 Software engineering — Product quality — Part 4: Quality in use metrics. Geneva, Switzerland: ISO, 2004.

147. Тихонов М.Н., ГуменюкВ.И., Хлобыстин Н.С., Храмов А.В., Туманов А.Ю. Социальная безопасность малых доз ионизирующих излучений. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: Сборник научных трудов 3 Всероссийской научно-практической конференции. 27-29 апреля 2011 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2011. – с. 186.

148. Тихонов М.Н., Храмов А.В., Туманов А.Ю. Механизм влияния естественных и техногенных электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: Сборник научных трудов 3 Всероссийской научно-практической конференции. 27-29 апреля 2011 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2011. – с. 165.

149. Туманов А.Ю. Модели и алгоритмы представления знаний для прогнозирования опасностей объектов техносферы и защиты от угроз в энергетике. Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та. – 2011.– № 4.

150. Туманов А.Ю., Храмов А.В. Концептуальные модели базы данных опасных объектов, источников опасности и факторов риска информационно-управленческой системы прогнозирования техногенных и природных катастроф в энергетике Материалы XVIII Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке». 17-18 февраля 2011 г., Санкт-Петербург. Т. 3. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2011.– с. 138.

151. Тутубалин В. Н., Барабашева Ю. М., Григорян А. А., Девяткова Г. Н., Угер Е. Г. Математическое моделирование в экологии: Историко-методологический анализ. Москва: «Языки русской культуры».–1999.

152. Установка реакторная. Пояснительная записка. Часть 2. Режимы работы. ЦПКУ.501213.010ПЗ1, ОКБМ.

153. Фаустова О.Г. Разработка методики интегральной оценки и управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций для повышения безопасности морских и мультимодальных грузоперевозок. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.

154. Федеральный закон «О Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» от 01.12.2007 № 317-ФЗ, а также участие в регулирующей деятельности МАГАТЭ.

155. Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 № 52-ФЗ.

156. Федеральный закон «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 № 170-ФЗ.

157. Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 11.07.2011 № 190-ФЗ.

158. Федеральный закон от 06.03.2006 N 35-ФЗ (ред. от 31.12.2014) «О противодействии терроризму».

159. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 24.11.2014) «Об охране окружающей среды».

160. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 31.12.2014) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

161. Федеральный закон от 21.12.1994 N 68-ФЗ (ред. от 02.05.2015) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

162. Федеральный закон от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 02.05.2015) «О пожарной безопасности».

163. Федеральный закон от 22.08.1995 N 151-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей».

164. Федеральный закон от 27.07.2006 N 149-ФЗ (ред. от 24.11.2014) «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».

165. ФЦП «Ядерная и радиационная безопасность России на 2000-2006 годы», ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года».

166. Экономические механизмы управления рисками чрезвычайных ситуаций: Учеб. пособие / Акимов и др. / МЧС России. – М.: ИПП «Куна».– 2004. – 312 с.

167. Лепп Ю.Ф. Учет энергопоглощающей способности борта крупнотоннажных танкеров при столкновении. «Вопросы судостроения», серия: Проектирование судов, выпуск 17, Л., 1978.

168. КЛТ-40 60/01РР1 Электронасос ГЦН 870/38. Расчет на прочность. Инв. № а1361 по учету ОАО "ОКБМ".

169. КЛТ-40 140М/01РР1 Электронасос ЦНО 105/70. Расчет на прочность инв. № 888763ЦПКУ.501353.011 РР Трубопроводы газа системы компенсации давления и ГВД. Расчет на прочность. Инв.№ 876195 по учету ОАО "ОКБМ".

170. ЦПКУ.501333.011 РР Трубопроводы системы очистки и расхолаживания, отбора проб и аварийного охлаждения. Расчёт на прочность. Инв.№ 877727 по учету ОАО "ОКБМ".

171. ЦПКУ.501352.011 РР Трубопроводы пара и питательной воды. Расчёт на прочность. Инв.№ 873945 по учету ОАО "ОКБМ".

172. ЦПКУ.501337.003 РР трубопроводы системы компенсации давления. Расчёт на прочность. Инв.№ 873948 по учету ОАО "ОКБМ".

173. http: //ektor.ru/pages/ict2.asp?idr1=3&id1=9 (Доступ с экрана, 16.03.2016)

174. ЦПКУ.501351.054 РР Трубопроводы системы гидроперегрузки фильтров 1 и 3 контуров РУ2. Расчёт на прочность. Инв.№ 873950 по учету ОАО "ОКБМ".

175. http: //pro-arctic.ru/21/03/2015/technology/14630" (Доступ с экрана, 16.03.2016).

176. ЦПКУ.501359.007 РР Система заполнения кессона реакторной водой. Расчёт на прочность. Инв.№ 873951 по учету ОАО "ОКБМ".

177. Ларичев О.И., Мечитов А.И. Методологические проблемы анализа риска и безопасности использования новых технологий // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник / Под ред. Д.М. Гвишиани, В.Н. Садовского. — № 19. 1987. М.: Наука, 1988. — С. 26–44

178. Шахраманьян М. ГИС для прогнозирования чрезвычайных ситуаций. «Компьютерра» № 47 от 10 декабря 2001 года

179. Симанков В.С., Владимиров С.Н., Денисенко А.О., Черкасов А.Н. Методологические аспекты построения систем поддержки принятия решений. Краснодар: КубГТУ, 2008

180. Вылгина Ю.В. Разработка модели системы поддержки принятия решений на примере тепловых электростанций, дис. … канд. экон. наук .

181. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. Острейковский В.А., Швыряев Ю.В. 2008 г.

182. http://www.okbm.nnov.ru/russian/lomonosov. (Доступ с экрана, 16.03.2019).

183. Козлитин А.М. Развитие теории и методов оценки рисков для обеспечения промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса: дис. … д-ра тех. наук.

184. Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. М.: ЗАО ФИД "Деловой экспресс", 2001 - 344с.

185. Федеральный закон от 27 декабря 2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании».

186. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010—2011. Методы оценки риска.

187. Бригхем Ю., Гапенски Л. Финансовый менеджмент. - СПб.: 1998,

т. 1.

188. ГОСТ Р 51344-99. Безопасность машин. Принципы оценки и определения риска.

189. ГОСТ Р 51333. Безопасность машин. Основные понятия, общие принципы конструирования. Термины, технологические решения и технические условия.

190. Федеральный закон от 27 июля 2010 г. N 225-ФЗ "Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте".

191. Вылгина Ю.В. Разработка модели системы поддержки принятия решений на примере тепловых электростанций: дис. …к-та. тех.наук.

192. Симанков В.С. Автоматизация системных исследований / В.С. Симанков. — Краснодар: КубГТУ, 2002. — 376 с.

193. С.В. Иванов, Ю.И. Нечаев, А.В. Бухановский, Особенности проектирования и разработки высокопроизводительных систем поддержки принятия решений для управления сложными техническими объектами. Сборник трудов XVII Всероссийской научно-методической конференции «Телематика, 2010 г.

194. Быков А.А. О проблемах техногенного риска и безопасности техносферы / Проблемы анализа риска. №3–2012 г.

195. Отчет по обоснованию безопасности. Ядерная энергетическая установка плавучего энергоблока проекта 20870. Раздел 15. Анализ аварий. 2011.

196. Официальный сайт МЧС России. http://www.mchs.gov.ru/dop/terms/item/85789, (дата обращения 14.11.2019).

197. http://www.rusregister.ru/upload/iblock/054/part_5.pdf, (дата обращения 15.11.2019).

198. http://safety.s-system.ru/main/subject-101/text-176968117. html#tb_content, (дата обращения 16.11.2019).

199. http://50.mchs.gov.ru/pressroom/news/item/2330361,(дата обращения 16.11.2019).

200. Агапов, А. А. О соответствии программных средств TOXI + Risk 5 и TOXI + Гидроудар новым нормативно-методическим документам Ростехнадзора и МЧС России / А. А. Агапов, М. В. Лисанов, А. С. Софьин // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 8. – С. 40-44.

201. Кипер А. В., Станкевич Т. С. Разработка системы поддержки принятия решений руководителя тушения пожара на базе нечеткой нейронной сети ANFIS при пожаре на территории морского порта // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычисл. техн. информ. – 2013. – № 1. – С. 38–46.

202. Кипер А. В., Станкевич Т. С. Разработка нечеткого классификатора на базе нечеткой системы Сугено для определения ранга пожара на территории морского порта // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2012. – № 2. – С. 18–25.

203. Калмыков А.В. Обеспечение устойчивого развития промышленного предприятия на основе превентивных способов управления с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций: дис. … к-та тех. наук.

204. Туманов А. Ю. Автоматизированная система количественной оценки риска инновационного проекта: дис. …к-та. тех.наук., 2006.

205. Минько В.М. Об оценке и оптимальном управлении снижением профессиональных рисков / В.М. Минько. – М.: Издательство «Новые технологии», 2010 – 24 с.

206. Приказ Ростехнадзора от 10.02.2017 N 51 "Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии "Рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности для хранилищ отработавшего ядерного топлива" (вместе с "РБ-116-17...").

207. Чижиченко, В.П. Анализ причин взрывов кислородных баллонов / В.П. Чижиченко // Охрана труда. 2010. – № 4. – Электронный ресурс:

http://www.kislorod.in.ua/index.php/2010-06-21-07-41-11.

208. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 году: Справочно-информационный портал Фед. службы по экол., технологич. и атомному надзору [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports.pdf, свободный. – загл. с экрана. (Дата обращения 15.02.2019).

209. Морозов В. В., Соботковский Б. Е., Шейнман И. Л. Методы обработки результатов физического эксперимента. Санкт-Петербург. 2004.

210. Скрынников А.А., Багиян А.А. Определение скорости осколочных поражающих элементов на траектории их полета // Юбилейная Всероссийская научно-техническая школа-семинар «Передача, обработка и отображение информации». Ставрополь, 2007. – С. 69-71.

211. Вучков И. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / И. Вучков, Л. Бояджиева, Е. Солаков. – М.: Финансы и статистика ,1987. - 239 с, ил.

212. Джашеев К.А.-М., Джашеева З.А.–М. Монограммный метод анализа результатов многофакторного эксперимента // Успехи современного естествознания. – 2008 – № 8 – С. 19-28.

213. Finney D.J. Probit analysis. 3 ed. Cambridre: University Press. 1980, p.333.

214. Идье Ф., Драйард Д., Джемс Ф., Рус М., Садуле Б. Статистические методы в экспериментальной физике/ пер. с англ. под ред. А.А.Тяпкина. – М.: Атомиздат, 1976. – 335 с.

215. Храмов Г.Н. Техногенные взрывы. – СПб.: ГПУ, 2002. – 50 с.

216. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф., Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 640 с.

217. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П. и др. Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат, 1970, – 536 с.

218. Кармишин А.М., Гагарин М.В., Кравченко О.П. Теория поражающего действия ОМП. – М.: ВАХЗ, 1995. – 151 с.

219. Калитаев А.Н., Бринцев А.В. и др. Защита от оружия массового поражения. – М.: Воениздат, 1989.

220. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 251 с.

221. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.

222. Ефимов В.Ф., Кармишин А.М., Титоренко Л.П. К вопросу о показателях опасности техногенных аварий/ в материалах Всероссийской (межведомственной) конференции (24 декабря 2003 года). – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – с. 76 – 88.

223. Белов П.Г. Моделирование опасных процессов в техносфере. Методическое пособие. – К.: КМГУА, 1999 – 124 с.

224. https://energybase.ru/news/companies/na-plavucem-energobloke-pates-akademik-lomonosov. Режим доступа: свободный. – загл. с экрана. (Дата обращения 15.02.2019).

225. https://network.bellona.org/content/uploads/sites/Doklad_po_transportirovke_WEB.pdf. Режим доступа: свободный. – загл. с экрана. (Дата обращения 15.02.2019).

226. Филиппов В.Н. Пономарев В.М. Проблемы и методы защиты вагонов-цистерн при аварийных ситуациях. Наука и техника транспорта. – № 1, 2017. – С. 21-28.

227. Кармишин А.М. Киреев В.А. Математические методы фармакологии и токсикологии: Монография/ изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. – 333с.: ил.

228. Скачек М.А. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация. — М.: МЭИ, 2014. — 552 с.

229. "Методические рекомендации по разработке планов повышения защищенности критически важных объектов, территорий субъектов Российской Федерации и муниципальных образований" (утв. МЧС России 28.12.2011 N 2-4-60-21-14).

230. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – 6-е изд. стер. –М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.: илл.

231. Крамер Г. Математические методы статистики. – Москва – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2003. – 648 с.

232. Вентцель Е.С, Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

233. Способ определения пробивного действия осколков боеприпасов и устройство для его осуществления: пат. 2521932 Рос. Федерация: МПК F42B 35/00 (2006.01) / С.М. Мужичек, В.В. Ефанов, П.В. Шутов, Д.А. Корсаков; заявитель и патентообладатель. – № 2013115548/11; заявл. 05.04.2013; опубл. 10.07.2014. Бюл. № 19 . – 3 с.: ил.

234. Приказ Ростехнадзора от 11.03.2013 N 96 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств"

235. Наумов, В.А. Методы обработки гидрологической информации: лабораторный практикум для студентов вузов, обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки «Природообустройство и водопользование» / В.А. Наумов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. – 118 с.

236. Ребро И.В. Прикладная математическая статистика для технических специальностей: учеб. пособие / И.В. Ребро, В.А. Носенко, Н.Н. Короткова; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград: ИУНЯ ВолгГТУ, 2011. – 149 с.

237. Kolmogoroff A. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione // Guornale dell' Instituto Italiano degli Attuari. 1933. V.4. №1. P.83-91.

238. Орлов А.И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, Омега-квадрат и ошибки при их применении. Научный журнал КубГАУ, №97(03), 2014 г.

239. Hubert W.Lilliefors. On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with mean fnd Variance. Journal of the American statistical association. Vol.62, no.318. (jun., 1967), pp 399-402.

240. Ахмедов И.М., Наумов В.А. О законе распределения разрывной нагрузки нити. Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2017, Т.3, №3.

241. А.В. Сикан. Практические приемы оценки параметров распределения Вейбулла при выполнении гидрологических расчетов. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 19 Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2011 – 195 с.

242. Национальный атлас Арктики. М.: АО «Роскартография», 2017.

Приложение А

Акты об использовании результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ:
Директор филиала АО «Концерн Росэнергоатом»
«Дирекция по сооружению и эксплуатации плавучих атомных теплоэлектростанций»
М.В. Шурочков
«15» мая 2017 г.

Акт
о внедрении результатов диссертационной работы
Туманова А.Ю.

Теоретические аспекты оценки опасности техногенной аварии при транспортировании радиоактивных материалов в мультимодальных перевозках

Научно-техническая комиссия в составе начальника учебно-тренировочного подразделения ПАТЭС Григоряна Г.Н., начальника отдела подготовки и эксплуатации ПЭБ Гаврилова Е.И. и начальника отдела управления персоналом Туниманова А.Г. составили настоящий акт в том, что научные результаты диссертационной работы Туманова А.Ю. — модели и методики оценки риска на потенциально-опасных объектах энергетики морского базирования использованы в деятельности, выполняемой филиалом АО «Концерн Росэнергоатом» «Дирекция по сооружению и эксплуатации плавучих атомных теплоэлектростанций». Применение предложенных в работе методик оценки прогнозного предотвращенного ущерба на ПАТЭС, методик проведения численного вычислительного эксперимента оценки апостериорных вероятностей отказов, инцидентов, аварий с использованием аппаратно-программного комплекса по оценке риска, включающего в себя экспертную систему байесовского типа, позволяет сократить количество натурных испытаний технических систем и получить оценки качества и эффективности систем обеспечения безопасности, управления и подготовки персонала ПАТЭС к чрезвычайным ситуациям природного и техногенного характера.

Начальник учебно-тренировочного подразделения ПАТЭС — Г.Н. Григорян
Начальник отдела подготовки и эксплуатации ПЭБ — Е.И. Гаврилов
Начальник отдела управления персоналом — А.Г. Туниманов

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор-директор
Санкт-Петербургского филиала
НОУ ДПО «ЦИПК Росатома»
Т.Н. Таиров
«___» _____ 2017 г.

Акт
о реализации научных результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук
Туманова А.Ю.

Теоретические аспекты оценки опасности техногенной аварии при транспортировании радиоактивных материалов в мультимодальных перевозках

в деятельность, выполняемую Санкт-Петербургским филиалом НОУ ДПО «ЦИПК Росатома»

Научно-техническая комиссия в составе руководителя Санкт-Петербургского отделения Центра компетенций по безопасности Белякова В.А., руководителя УМЦ «ЯиРБ» Санкт-Петербургского филиала НОУ ДПО «ЦИПК» Бомбина Р.Н., ведущего эксперта НОУ ДПО «ЦИПК» Любимова В.К. составили настоящий акт в том, что научные результаты диссертационной работы Туманова А.Ю. — модели и методики оценки риска на потенциально-опасных объектах энергетики морского базирования использованы в деятельности, выполняемой Санкт-Петербургским филиалом НОУ ДПО «ЦИПК Росатома», в частности, разработанная Тумановым А.Ю. классификация факторов риска чрезвычайных ситуаций на потенциально-опасных объектах энергетики и обобщенная методика оценки прогнозного предотвращенного ущерба на плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) реализована в учебном процессе Санкт-Петербургского филиала НОУ ДПО «ЦИПК Росатома» при разработке учебных программ УМЦ «Ядерная и радиационная безопасность».

Руководитель отделения
Центра компетенций по безопасности В.А. Беляков

Руководитель УМЦ «ЯиРБ» Р.Н. Бомбин

Ведущий эксперт В.К. Любимов

Приложение Б

Перечень исходных событий и их классификация

[Отчет по обоснованию безопасности. Ядерная энергетическая установка плавучего энергоблока проекта 20870. Раздел 15. Анализ аварий. 2011]

В требованиях нормативных документах Ростехнадзора, а также Российского морского регистра судоходства к атомным судам и плавучим сооружений [121] оговаривается рекомендуемый перечень исходных событий, подлежащих рассмотрению при обосновании безопасности судов с ЯЭУ.

В качестве причин аварийных ситуаций с ЯЭУ, вызванных внешними воздействиями на ПЭБ, рассматриваются природные факторы, падение летательных аппаратов, а также взрывы в месте базирования.

При разработке перечня исходных событий должны быть учтены конструктивные особенности ПЭБ и характеристики района эксплуатации ПЭБ.

В качестве причин внешних воздействий на ПЭБ рассматриваются природные и техногенные факторы, представленные в таблице Б.1. Из таблицы Б.1 видно, что часть исходных событий учитываются при проектировании выполнением соответствующих норм и правил Регистра [121,122], и при анализе аварийных ситуаций в ООБ ПЭБ не рассматриваются.

Таблица Б.1 - Исходные события, связанные с внешними воздействиями на ПЭБ, пожарами и взрывами на борту.

№ п/п	Исходное событие	Тип воздействия	Необходимость анализа в ООБ ПЭБ
1.	Воздействие волнения	Природное	Нет (Учитывается Правилами Регистра)
2.	Воздействие ветра	Природное	Нет (Учитывается Правилами Регистра)
3.	Воздействие льда	Природное	Нет (Учитывается Правилами Регистра)
4.	Приливы, отливы, нагонные явления	Природное	Нет (Учитывается в проекте системы раскрепления ПЭБ)
5.	Температура наружного воздуха	Природное	Нет (Учитывается Правилами Регистра)
6.	Снегопады	Природное	Нет (Учитывается Правилами Регистра)
7.	Сейсмическое воздействие	Природное	Да
8.	Столкновение с другим судном	Техногенное	Да
9.	Посадка на мель	Техногенное	Да
10.	Затопление отдельных отсеков	Техногенное	Нет (Учитывается Правилами Регистра)
11.	Затопление ПЭБ	Техногенное	Да
12.	Падение летательного аппарата	Техногенное	Да
13.	Пожары на борту	Техногенное	Да
14.	Разрушение турбины с образованием летящих тел	Техногенное	Да
15.	Взрывы внешнего источника	Техногенное	Да
16.	Волны цунами	Природное	Да
17.	Взрывы на борту	Техногенное	Да

Классификация исходных событий

Аварийные ситуации, связанные с внешними воздействиями, могут вызвать большие разрушения корпусных конструкций судна и привести к множественным отказам оборудования ЯЭУ по, так называемой, общей причине. Поэтому для классификации аварийных ситуаций, вызванных

внешними воздействиями, на проектные и запроектные нельзя использовать принцип единичного отказа, который применяется при анализе аварий по внутренним причинам.

В соответствии с рекомендациями нормативного документа [109] при анализе внешних воздействий на ядерно- и радиационные опасные объекты допускается не учитывать в проектных основах процессы и факторы техногенного происхождения, вероятность реализации которых меньше 10^{-6} событий в год. Таким образом, аварии, вызванные внешними воздействиями, могут быть разделены на проектные и запроектные, исходя из вероятности их возникновения. Аварии, вероятность исходных событий которых менее 10^{-6} событий в год, относятся к запроектным.

Сейсмическое воздействие

Район размещения ПАТЭС характеризуется сейсмической активностью.

Результаты исследования сейсмической активности в районе размещения ПАТЭС [129] показывают, что вероятность превышения 9-ти балльных сотрясений по шкале MSK-64 за 50 лет составляет 4.8%, а для 8-ми балльных – 28.6%. Таким образом, рассматриваемые участки относятся к 9-ти балльной зоне сейсмических сотрясений по шкале MSK-64 с 5% долей вероятности превышения балльности за 50 лет.

Для анализа сейсмического воздействия на ПЭБ рассматривается максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64.

Навигационные аварии

В качестве навигационных аварий рассматриваются столкновения ПЭБ с другими судами и посадка на мель.

Столкновение с другими судами

В месте базирования ПЭБ установлен в акватории ограниченной глубины и защищен гидротехническими сооружениями, что предотвращает несанкционированное приближение к нему судов и практически исключает возможность столкновения таранного типа. В качестве исходного события навигационной аварии в месте базирования рассматривается навал швартующегося судна, который может иметь место при подходе к ПЭБ танкера для передачи дизельного топлива. Данная навигационная авария рассматривается как проектная.

Навигационные аварии, связанные с тараном ПЭБ другим судном, в принципе, могут произойти на этапе буксировки ПЭБ. Вероятность столкновения ПЭБ с другими судами при буксировке оценивается на основе анализа статистических данных столкновений судов мирового флота. Вероятность получения ПЭБ водотечной пробоины составляет $4 \cdot 10^{-5}$ год$^{-1}$ [73].

В соответствии с Правилами Регистра [108] конструктивная защита атомного судна должна исключать проникновения таранящего судна, приводящие к повреждению защитного ограждения, при принятых проектом столкновениях. Используя понятие критической скорости — максимальной скорости таранящего судна, при которой разрушается конструктивная защита, а защитное ограждение и ЗО атомного судна остаются неповрежденными, можно выделить проектные аварии, связанные со столкновениями. К проектным авариям относятся столкновения, при которых скорость таранящего судна меньше критической.

Вероятность повреждения корпуса ПЭБ в районе реакторного отсека до ЗО (т.е. с нарушением целостности защитного ограждения) составляет $1{,}1 \cdot 10^{-7}$ год$^{-1}$, а в районе хранилищ глубиной до помещения хранилищ ОТВС и ТРО – $0{,}7 \cdot 10^{-7}$ год$^{-1}$ [73], что позволяет отнести указанные аварии к запроектным.

Затопление ПЭБ

Непотопляемость ПЭБ обеспечивается при затоплении любых двух смежных отсеков для всех спецификационных случаев нагрузки [62]. Затопление ПЭБ в принципе возможно при затоплении не менее 3 – 4 отсеков [61] в результате тарана его другим судном под острым углом или при столкновении с подводным препятствием с образованием пробоины большой протяженности ниже ватерлинии. Вероятность такого события оценивается величиной $5 \cdot 10^{-7}$ год$^{-1}$ [73], что позволяют отнести такое затопление ПЭБ в результате столкновения к запроектным авариям.

Затопление ПЭБ на мелкой воде в месте базирования возможно при взрыве на борту с повреждением корпуса ниже ватерлинии и распространении воды в соседние отсеки через поврежденные переборки. В п.1.2.4 показано, что вероятность взрыва на борту ПЭБ мала (менее 10^{-6} событий в год), поэтому затопление на мелкой воде в зоне базирования относится к запроектным авариям.

Посадка на мель

Раскрепление в месте базирования обеспечивает надежное удержание ПЭБ при экстремальных внешних воздействиях повторяемостью 1 раз в 10000 лет [131], поэтому посадка ПЭБ на мель в пункте базирования при обрыве швартовных штанг не рассматривается. Посадка на мель с большей вероятностью может произойти в период морской буксировки ПЭБ и рассматривается как проектная авария.

При буксировке ПЭБ в штормовых условиях гипотетически возможен обрыв буксировочных связей и снос ПЭБ на мелководье со скалистым дном. В этом случае, если не удастся снять ПЭБ с отмели, в результате многократных ударов о скалистый грунт может быть разрушен корпус ПЭБ, повреждены защитные барьеры РУ и хранилищ ОТВС и ТРО. Данная ситуация рассматривается как запроектная авария [71].

Пожары

Пожары являются одним из наиболее распространенных видов происшествий на судах.

Анализ статистических данных по аварийности на судах [10] показывает, что основными источниками воспламенения горючей нагрузки являются:

появление открытого огня в результате нарушения правил пожарной безопасности (57-68% случаев);

искры и дуга, возникающие при коротких замыканиях в электрооборудовании (13-14%);

нагретые поверхности механизмов, паропроводов, газоходов (12%);

самовозгорание горючих материалов (5-6%).

Источниками воспламенения в помещениях энергетической установки ПЭБ могут быть:

для помещений с энергетическим оборудованием (в помещениях машинных отделения, в помещение котельного отделения, в помещение вспомогательных механизмов РДГ, в помещении вспомогательных механизмов КО, помещениях АДГ и РДГ):

нагретые поверхности механизмов, паропроводов, газоходов;

искры и электрическая дуга при замыканиях в электрооборудовании;

самовозгорание протирочной ветоши;

для помещений ГРУ, ГРЩ, ЩРУ и др. специальных помещений электрооборудования:

электрическая дуга, возникающая при коротких замыканиях в электрораспределительных устройствах;

нагретые до высокой температуры токопроводящие жилы электрических кабелей при их перегрузке по току;

для постов управления:

электрическая дуга, возникающая при коротких замыканиях в электрораспределительных устройствах;

нагретые до высокой температуры токопроводящие жилы электрических кабелей при их перегрузке по току.

Пожар может вызвать множественные отказы оборудования и повреждение коммуникаций, привести к обесточиванию ПЭБ, нарушению пределов безопасной эксплуатации РУ.

При анализе аварийных ситуаций рассматриваются пожары в помещениях с оборудованием ЯЭУ, отказы которого влияют на ядерную и радиационная безопасность, помещения с оборудованием электроэнергетической системы, а также помещения ЯЭУ, в которых наиболее вероятно возникновение очагов возгорания.

В качестве исходных событий аварийных ситуаций рассматриваются возникновения пожаров в следующих помещениях ПЭБ:

в помещениях аппаратной №№ 1,2;

в помещениях ГРУ №№1,2;

в помещениях трансформаторной №№1,2;

в помещениях ЩРУ №№1,2 и №№3,4;

в помещениях АДГ. №№ 1,2,3,4;

в помещениях РДГ №№1,2;

в помещениях вспомогательных механизмов РДГ №№ 1,2;

в помещении котельного отделения;

в помещениях ПАР №№1,2;

в помещениях НТВС №№1,2;

в помещении хранения новых изделий СУЗ и ИК;

в помещениях ГРЩ №№1,2;

в помещении вспомогательных механизмов КО;

в помещении перегрузочном;

в помещении перегрузки ОТВС.

Вероятности возникновения пожаров в помещениях энергетической установки можно оценить на основании статистических данных по пожарам на судах мирового флота, при этом надо учитывать состав оборудования и размеры помещения. В таблице Б.2 приведены оценки вероятностей возникновения пожаров в помещениях энергетической установки ПЭБ [10]. На основании этих данных, пожары в помещениях энергетической установки следует рассматривать как проектные аварии.

Таблица Б.2 - Вероятности возникновения пожаров в помещениях энергетической установки.

№ п/п	Наименование помещений	Вероятность пожара (1 /год)
1.	МО № 1 и № 2	$4 \cdot 10^{-3}$
2.	ПАР № 1 и № 2	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$
3.	Аппаратная № 1 и № 2	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$
4.	Помещение автоматики № 1 и № 2	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$
5.	Помещение автоматики № 3 и № 4	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$
6.	Помещение ЩРУ № № 1, 2, 3, 4	$7{,}5 \cdot 10^{-6}$
7.	Помещение НТВС № 1 и № 2	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$
8.	Помещение хранения СУЗ, ИК	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$
9.	АДГ № № 1, 2, 3, 4	$2{,}1 \cdot 10^{-5}$
10.	РДГ № 1 и № 2	$8{,}1 \cdot 10^{-5}$
11.	Котельное отделение	$8 \cdot 10^{-4}$
12.	ЦПУ	$8{,}7 \cdot 10^{-5}$
13.	Трансформаторная № 1 и № 2	$4{,}5 \cdot 10^{-5}$
14.	ГРУ № 1 и № 2	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$
15.	ГРЩ № 1 и № 2	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$
16.	Помещение пожарных насосов	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$
17.	Котельное отделение	$8 \cdot 10^{-4}$

Взрывы и летящие тела, образованные при разрушении турбины

Взрывы газовых баллонов на борту ПЭБ

Газовые баллоны являются источниками потенциальной опасности возникновения взрыва, который приводит к разрушению корпусных конструкций и выходу из строя оборудования ПЭБ.

Взрыв баллонов может быть вызван следующими причинами.

Нарушение целостности газового баллона вследствие поломки какого-либо узла (арматуры), повреждения или коррозии корпуса, неправильной эксплуатации может привести к взрыву баллона при рабочем давлении. Вероятность взрыва баллона (сосуда) высокого давления в этом случае составляет 10^{-7} 1/ год [72].

Превышение предельного значения давления в случае пожара. Для баллонов с нереагирующими газами (воздух, азот, аргон) при несрабатывании предохранительного клапана давление газа при нагреве повышается, до тех пор, пока не произойдет взрыв. В баллонах с реагирующими газами (кислород и ацетилен) может возникнуть детонация, приводящая к скачкообразному росту давления и взрыву.

Вероятность взрыва баллонов при пожаре в помещении:

$$\mathrm{P}_{\text{взрыв}} = \mathrm{P}_{\text{пож.}} \cdot \left(1 - \left(1 - \mathrm{P}_{\text{неоткр}}\right)^{n_{\text{бол}}}\right) \qquad (Б.1)$$

$\mathrm{P}_{\text{пож}}$ – вероятность возникновения пожара в помещении

$\mathrm{P}_{\text{неоткр}}$ – вероятность неоткрытия предохранительного клапана

$n_{\text{бал}}$ – количество баллонов в помещении

Предохранительные клапаны, установленные на газовых баллонах, в соответствии с ОСТ5.5032-83 имеют вероятность безотказной работы P=0.98 в течении непрерывной работы T=5000 ч.

Отказ предохранительного клапана может проявиться в неоткрытии, преждевременном открытии, заклинивании в полностью или частично открытом положении. По данным [143] вероятность неоткрытия предохранительных клапанов составляет $\mathrm{P}_{\text{неоткр}} = 10^{-5}$ 1/треб.

Наиболее пожароопасным помещением ПЭБ является МО, где размещено 6 баллонов. Вероятность возникновения пожара в МО составляет $\mathrm{P}_{\text{пож}}=4\cdot10^{-3}$ 1/год (таблица Б.2) и в соответствии с (Б.1) вероятность взрыва баллонов в МО составляет $\mathrm{P}_{\text{взрыв}}=2\cdot10^{-7}$ 1/год.

В соответствии с НП-064-05 «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационные опасные объекты»

[109] в проектных основах допускается не учитывать техногенные факторы, частота реализации которых меньше 10^{-6} событий в год. Таким образом, взрыв газовых баллонов на борту ПЭБ, вероятность которого меньше указанного значения, относится к запроектным авариям.

При пожаре давление и температура газа в баллоне в момент взрыва выше, чем при взрыве баллона в рабочих условиях, соответственно и последствия взрыва при пожаре будут более тяжелыми. Исходя из консервативного подхода при анализе безопасности ПЭБ в качестве исходных событий запроектных аварий рассматриваются взрывы газовых баллонов в случае пожара.

Летящие тела, образованные при разрушении турбины

В качестве причины образования летящих предметов, обладающих достаточной кинетической энергией для повреждения корпусных конструкций и оборудования ПЭБ может быть разрушение оборудования ПТУ, имеющего вращающиеся детали, в частности, отрыв рабочей лопатки турбины ТА при превышении скорости вращения. В истории отечественного турбостроения имели место случаи отрыва лопаток, поэтому при анализе безопасности ПЭБ такая авария рассматривается как проектная.

Взрыв внешнего источника за пределами ПЭБ

К внешним источникам взрывной опасности для ПЭБ, размещаемого на площадке «Приморский» в районе г. Вилючинск, относятся: объекты военно-морского флота и пограничной службы, связанные с хранением боеприпасов и ВВ, надземное хранилище мазута, подземные емкости горючего на АЗС. Также рассматривается авария бензозаправщиков на ближайшей к площадке ПАТЭС автодороге, сопровождающаяся разливом горючего [129].

Дополнительно в качестве источника потенциальной опасности взрыва рассматривается танкер, который может эпизодически использоваться для дозаправки ПЭБ дизельным топливом.

Взрывы внешнего источника за пределами ПЭБ рассматриваются как проектные аварии.

Падение летательного аппарата

При оценки безопасности ПЭБ при авиационных катастрофах использован апробированный для радиационно-опасных объектов подход, базирующийся на применении в качестве исходного параметра, характеризующего безопасность, величины дистанции отбора (ВДО) с заданным уровнем отбора по безопасности [14]. Такой подход предусматривает определение допустимых величин удаления границ воздушных трасс и маршрутов полетов летательных аппаратов ВВС, исходя из принятого в международной практике уровня вероятности (10^{-7}) пересечения границ внешнего контура ПЭБ падающим летательным аппаратом или его обломками.

Минимальное удаления границ воздушных трасс и маршрутов полетов летательных аппаратов от ПЭБ [76] составляет:

для дозвуковых самолетов - 18 км;

для сверхзвуковых - 34 км;

для вертолетов - 6 км.

При условии соблюдения указанных ограничений на полеты и учитывая, что на ПЭБ не предусмотрена посадка вертолета (отсутствует взлетно-посадочная площадка), падение летательного аппарата на ПЭБ следует рассматривать как запроектную аварию.

В качестве запроектной аварии рассматривается падение на ПЭБ вертолета массой 10 т с высоты 50 м (требование НД [121]).

Перечень исходных событий

Перечень и классификация исходных событий для анализа безопасности ЯЭУ при внешних воздействий на ПЭБ, взрывах и пожарах борту, разработанный в соответствии с рекомендациями нормативного документа НП-023-2000 [108] и требованиями Правил РМРС [121], представлен в таблице Б.3.

Таблица Б.3 - Перечень и классификация исходных событий

№ п/п	Исходное событие	Классификация аварийной ситуации	Требования Правил РМРС	Рекомендации НП-023-2000
1.	Навал пришвартованного судна	Проектная	Столкновение	Ударные воздействия столкновения
	Таран со скоростью меньше критической	Проектная		Столкновение с судном (пир сом) с поступлением воды в энергетические и вспомогательные отсеки
	Таран со скоростью больше критической	Запроектная		
2.	Посадка на мель Удар о подводный камень Разрушение корпуса ПЭБ при посадке на скалистую отмель	Проектная Проектная Запроектная	Посадка на мель	Посадка на мель Ударные воздействия посадки на мель
3.	Затопление на мелкой воде Затопление на глубокой воде	Запроектная Запроектная	Затопление на мелкой воде Затопление на глубокой воде	Затопление на мелкой воде Затопление на глубокой воде
4.	Падение вертолета	Запроектная	Падение вертолета	Падение вертолета массой 10 т с высоты 50 м на помещения ЯЭУ, на корпусные конструкции судна, содержащие потенциально опасное оборудование

ПЕРЕЧЕНЬ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

Сценарии запроектных аварий, приводящие к повышенным выбросам радионуклидов в окружающую среду. Уязвимые места АТЭС

При обосновании безопасности РУ анализируется широкий спектр запроектных аварий, включающих набор дополнительных к исходным событиям технически возможных отказов элементов систем безопасности и (или) ошибочных действий персонала сверх единичных. В перечень включен также ряд аварий, связанных с постулированными исходными событиями, выходящими за рамки проектных режимов, и по условиям их реализации являющихся запроектными.

В процессе разработки сценариев запроектных аварий учтен накопленный опыт по обоснованию безопасности установок с водо-водяными реакторами, а также учтены аварии, имевшие место на действующих АЭС и прототипных установках.

При формировании перечня учитывалось, что анализ запроектных аварий должен решать следующие основные задачи:

– определение уязвимых мест энергоблока с реакторной установкой;

– разработка мер по управлению запроектными авариями, в том числе тяжелой аварией;

– определение резерва времени для действий персонала по управлению аварией.

С учетом того, что при разработке мер по управлению запроектными авариями определяются оперативные цели безопасности, признаки состояния объекта и критерии реализации аварии того или иного уровня тяжести, все запроектные аварии объединены в следующие классы:

аварии при внутренних событиях с герметичным первым контуром, включая аварии с непреднамеренным изменением реактивности и нарушением теплоотвода;

аварии с потерей теплоносителя первого контура (в т.ч. в пределах защитной оболочки и с байпасированием ЗО);

аварии на остановленном реакторе и при обращении с ядерным топливом;

аварии при внешних воздействиях.

Аварии при внутренних событиях с герметичным первым контуром не связаны непосредственно с выходом радиоактивных продуктов за установленные границы, однако они потенциально опасны с точки зрения перерастания в аварию с потерей теплоносителя или повреждения ТВЭЛов из-за ухудшения условий теплосъема при герметичном первом контуре.

В перечне также специально выделены сценарии запроектных аварий, исследуемые с точки зрения водородной безопасности.

В качестве потенциальных источников большого выброса радиоактивных продуктов рассматриваются ТВС в составе активной зоны (в реакторе), в хранилище отработавшего топлива и перегружаемые ТВС. Радиационные последствия запроектных аварий определяются также с учетом потери в большем масштабе, по сравнению с проектными авариями, активного теплоносителя первого контура за пределы контура локализации.

Таким образом, при разработке перечня охвачены все типы возможных запроектных аварий. Принятая классификация позволяет определить типовые способы управления (средства управления) запроектными авариями.

Характерные группы сценариев запроектных аварий

Определение путей развития (сценариев) запроектных аварий выполнено в соответствии с алгоритмами включения систем безопасности при возникновении исходных событий на основе перебора возможных состояний установки и отказов в системах.

При герметичном первом контуре вводятся в действие системы безопасности, выполняющие функции аварийной остановки реактора и

аварийного отвода тепла. В авариях с разгерметизацией первого контура дополнительно к указанным функциям требуется поддержание активной зоны под заливом теплоносителя.

Следует отметить, что последняя из указанных функций является наиболее критичной для аварий с разгерметизацией первого контура, а выполнению функций аварийной остановки реактора и аварийного отвода тепла способствуют следующие благоприятные факторы:

вскипание теплоносителя при разгерметизации первого контура приводит к эффективному самоглушению реактора, в том числе при отказах РО СУЗ;

исходные события с разгерметизацией первого контура не связаны непосредственно с отказами систем нормального и аварийного теплоотвода, и поэтому потеря резервированных средств расхолаживания практически исключена при авариях с течью первого контура (ухудшение условий расхолаживания рассматривается в постулированной запроектной аварии с полным обесточиванием при разгерметизации первого контура – то есть с отказом активных каналов расхолаживания).

Системы, обеспечивающие безопасность в проектных авариях, включаются автоматически. В запроектных авариях в дополнение к дистанционному управлению, которое предусматривается для всех систем, могут быть также выполнены корректирующие действия персонала по месту размещения оборудования за пределами защитной оболочки, обеспечивающие ввод систем в действие. Вместе с тем, в перечне запроектных аварий рассматриваются отказы систем безопасности, включаемых автоматически, без учета вмешательства персонала. Такой подход позволяет определить предельные возможности установки, запасы времени, которыми располагает персонал, а также необходимые меры управления авариями.

В запроектных авариях рассматриваются отказы каналов или отдельных систем в целом, или отказы в разных системах безопасности, которые приводят к сокращению резервов времени на корректирующие действия.

В спектре аварий при герметичном первом контуре можно выделить следующие характерные группы, в границах которых реакция систем качественно одинакова, а также близки возможности управления авариями:

аварийные режимы без срабатывания аварийной защиты реактора (отказы РО АЗ или РО КГ или УСБ по функции аварийной остановки реактора рассматриваются дополнительно к определяющим исходным событиям проектных теплоотводных и реактивностных аварийных ситуаций);

аварии с нарушением распределения энерговыделения в активной зоне или увеличением теплоотвода от первого контура вследствие постулированных запроектных реактивностных исходных событий, в том числе при дополнительных отказах УСБ;

аварии с нарушением условий теплоотвода от реактора с отказами каналов систем расхолаживания.

В авариях с разгерметизацией первого контура в зависимости от места течи реакция систем установки несколько отличается в части проявления аварийных сигналов и выполнения функций системами локализации. Характерными группами для данного типа аварий являются:

а) разгерметизация первого контура внутри защитной оболочки, включая:

аварии с отказами в САОЗ для определяющих исходных событий, приводящих к потере теплоносителя;

разгерметизацию корпусных конструкций (рассматривается обрыв стойки привода СУЗ, включая реактивностных аспект аварии);

аварию с отказом на автоматическое закрытие локализующей арматуры системы вентиляции ЗО;

б) течи первого контура с байпасированием ЗО, включая:

межконтурную разгерметизацию парогенератора с отказом локализующей арматуры;

течи из первого контура в третий с отказом локализующей арматуры.

течь системы отбора проб теплоносителя первого контура (вне ЗО) с отказом локализующей арматуры.

Следует отметить, что последняя из указанных аварий может реализоваться лишь при разрыве трубопровода на относительно малом интервале времени - во время отбора пробы теплоносителя первого контура.

В запроектные аварии на остановленном реакторе входят характерные представительные сценарии каждого типа (реактивностные, теплоотводные, с разгерметизацией первого контура). При определении аварий учтена специфика состояния установки и реакции систем при остановленном реакторе – как при герметичном, так и при вскрытом первом контуре.

В запроектных авариях при обращении с топливом и радиоактивными средами рассматриваются падения контейнера с радиоактивным источником (с ОТВС или со сборником отработавшей шихты фильтра первого контура), что может быть следствием обрыва двойной строповки (запроектное исходное событие). В отношении хранилища отработавшего топлива рассматривается отказ всех каналов системы охлаждения баков хранения ОТВС.

Специфические вопросы обеспечения водно-газового режима и взрывобезопасности анализируются в группе запроектных аварий, приводящих к накоплению потенциально взрывоопасной смеси в реакторе и в помещениях.

Представительные сценарии запроектных аварий

На основе предварительно проведенного анализа в перечень запроектных аварий включены сценарии, являющиеся наиболее критичными «представителями» для всех указанных выше классов аварий, потенциально опасные с точки зрения реализации аварии с наиболее неблагоприятными последствиями (по параметрам реактора, резервам времени, возможностям управления аварией и др.).

Отбор представительных сценариев проведен с учетом результатов инженерно-физических расчетов проектных аварий, позволяющих выявить наиболее неблагоприятные исходные события.

Представительные сценарии запроектных аварий характеризуются следующими особенностями.

Изменение полей энерговыделения в активной зоне сверх проектного масштаба, потенциально опасное с точки зрения локального перегрева ТВЭЛов, может иметь место при несанкционированном извлечении РО СУЗ или при их падении. Предусмотренная в СУЗ эшелонированность защиты исключает как проектную аварию (с точки зрения нормативного количества отказов и ошибок персонала) несанкционированное извлечение одновременно перемещаемых РО КГ. В запроектных авариях для обоснования реализации принципа «защиты в глубину» указанные нарушения (извлечение, падение РО СУЗ) последовательно усугубляются отказами в СУЗ: блокировок, алгоритма перемещения (обнаружения и остановки перемещения), аварийной остановки реактора.

В авариях при исходно герметичном первом контуре неформирование сигналов АЗ (отказы автоматики) или зависание РО СУЗ (РО КГ или РО АЗ) рассматриваются для таких аварийных режимов, как:

прекращение отбора пара на ПТУ,

максимальное увеличение расхода пара по второму контуру,

прекращение подачи питательной воды,

отключение всех ЦНПК,

полное обесточивание двух ГРЩ собственных нужд,

несанкционированное извлечение одновременно перемещаемых РО КГ.

Разрыв паропровода внутри защитной оболочки рассматривается с точки зрения максимального повышения давления в ЗО. В реактивностном аспекте последствия аналогичны разрыву паропровода за пределами ЗО, рассматриваемому в качестве проектного (все участки паропроводов внутри ЗО рассчитаны на давление первого контура и в процессе эксплуатации работают при существенно пониженном - относительно расчетного - давлении, в связи с чем разрыв внутри ЗО относится к запроектным).

В авариях с нарушением теплоотвода рассматривается несанкционированное отключение баллонов ГВД – применительно к исходному событию с прекращением нормального теплоотвода вторым контуром (автоматически баллоны ГВД отсекаются от КД реактора только при течах первого контура). В такой ситуации образуются жесткие условия компенсации давления первого контура (анализ аварии проводится с точки зрения максимально возможного повышения давления первого контура).

Резервные возможности отвода тепла от реактора определяются в аварийных сценариях с отказом активных каналов САР – применительно к исходному событию с прекращением нормального теплоотвода вторым контуром (прекращение подачи питательной воды) и для полного обесточивания. В последнем случае отказ активных каналов системы аварийного расхолаживания является следствием постулированного отказа источников нормального, резервного и аварийного электроснабжения переменного тока. В предельном случае – в сценарии с полным отказом УСБ – аварийная остановка реактора и включение пассивной САР осуществляются от самосрабатывающих устройств.

В перечень запроектных аварий с разгерметизацией первого контура, наряду с отказами САОЗ, включены аварии с полным обесточиванием

установки – потерей всех источников переменного тока, вызывающей зависимый отказ активных систем безопасности: при разрыве трубопровода полным сечением и при малой течи первого контура.

Максимальный масштаб истечения теплоносителя первого контура в ЗО имеет место при разрыве трубопровода системы КД. Данная авария рассматривается с усугубляющими отказами – невключением подпиточных насосов САОЗ.

Для определения условий максимального повышения давления в ЗО рассматривается разрыв трубопровода первого контура в аппаратном помещении с неотключением баллонов ГВД (максимальный выход газа в ЗО).

Неотключение баллонов ГВД приводит также к увеличению потери теплоносителя из реактора вследствие более длительного поддавливания газом. В наибольшей степени такой ухудшающий эффект проявляется при межконтурной разгерметизации холодильника ЦНПК, поскольку ЦНПК приближены к входной камере активной зоны. Трубопроводы первого контура расположены в верхней части реактора, и при их разрывах неотключение ГВД не оказывает существенного поддавливания – газ выходит через разрыв в ЗО.

Аварии с байпасированием защитной оболочки рассматриваются при отказах локализующего барьера – резервированной запорной арматуры первого, второго, третьего контуров применительно к различным межконтурным течам:

разрыв трубки ПГ,

разрыв парового трубопровода-коллектора ПГ,

разгерметизация холодильника стойки привода СУЗ,

разрыв трубки холодильника ЦНПК,

разрыв трубки теплообменника первого-третьего контуров,

разрыв трубопровода отвода охлаждающей воды в теплообменнике первого-третьего контуров,

а также для разрыва трубопровода системы отбора проб вне ЗО (во время отбора пробы теплоносителя первого контура).

Незакрытие локализующей арматуры первого контура (на трубопроводах системы очистки и расхолаживания) рассматривается одновременно с отказами арматуры по третьему контуру применительно к течам в системе очистки – из первого контура в третий.

Расширительная цистерна третьего контура расположена за пределами защитной оболочки, при этом сброс среды из третьего контура в авариях с межконтурной течью может происходит про двум направлениям:

в защитную оболочку – при срабатывании предохранительного устройства, соединяющего объемы третьего контура и ЗО;

в специальное помещение за пределами ЗО — через трубопровод газоудаления из расширительной цистерны третьего контура, при открытой арматуре на этом трубопроводе.

Разгерметизация первого контура с невключением САОЗ рассматривается также при остановленном реакторе — в режиме поддержания его в горячем состоянии. Реактивностные аварии на остановленном реакторе обусловлены ошибочными действиями персонала при проведении демонтажных работ и перегрузке. Нарушение теплоотвода рассматривается в наихудших посылках — вследствие полного обесточивания. При этом учитываются особенности состояния остановленного реактора и энергоблока в целом при проведении различных работ (при перегрузке, при ремонте оборудования), обусловленные негерметичностью первого контура и защитной оболочки, нештатным состоянием систем контроля и управления, систем энергоснабжения, необходимостью поддренирования-подпитки первого контура и др.

Перечень запроектных аварий

Выбранные для расчетного анализа запроектные аварии представлены в таблице Б.4.

Таблица Б.4 – Перечень запроектных аварий

Группы запроектных аварий	Представительные сценарии запроектных аварий
1 Аварии при герметичном первом контуре	
1.1 Аварии с изменением реактивности	1.1.1 Несанкционированное извлечение одновременно перемещаемых РО КГ с нормальной или аварийной скоростью: – при пуске; – на минимальной или максимальной мощности энергетического диапазона. 1.1.2 Несанкционированное извлечение двух любых КГ с отказом системы обнаружения и остановки несанкционированного перемещения РО СУЗ и отказом УСБ по мощности и/или периоду ее удвоения *(при пуске, при работе на мощности)*. 1.1.3 Падение одного РО СУЗ (КГ, АЗ) с отказами в СУЗ: блокировок, алгоритма перемещения КГ, аварийной остановки реактора *(при разогреве, при работе на мощности)*. 1.1.4 Ошибочная загрузка и эксплуатация ТВС при неправильном размещении. 1.1.5 Разрыв паропровода внутри защитной оболочки.
1.2 Ожидаемые переходные режимы с отказами системы аварийной остановки реактора	1.2.1 «Зависание» всех КГ или групп АЗ или отказы УСБ по первым защитным параметрам или отказ УСБ по всем защитным параметрам на аварийную остановку реактора при исходных событиях: 1) прекращение отбора пара на ПТУ (закрытие клапанов на главных паропроводах); 2) максимальное увеличение расхода пара по второму контуру (полное открытие клапана травления и заклинивание его в этом положении); 3) прекращение расхода питательной воды (полное закрытие питательного клапана); 4) отключение всех ЦНПК; 5) полное обесточивание двух ГРЩ собственных нужд;
	6) несанкционированное извлечение одновременно перемещаемых РО СУЗ *(при пуске, при работе на мощности)*.

Продолжение таблицы Б.4

1.3 Нарушение теплоотвода с отказами в системе аварийного отвода тепла	1.3.1 Разрыв трубопровода питательной воды с отказом четвертого контура и отказом системы подачи забортной воды к технологическому конденсатору. 1.3.2 Разрыв трубопровода питательной воды с неподключением САР по автоматическим сигналам. 1.3.3 Полное обесточивание с отказом всех аварийных и резервных источников переменного тока. 1.3.4 Прекращение теплоотвода вторым контуром с несанкционированным отключением баллонов ГВД. 1.3.5 Разрыв трубопровода питательной воды с полным отказом УСБ. 1.3.6 Засорение контура циркуляции теплоносителя или частичное перекрытие входа в ТВС.
2.1 Аварии с разгерметизацией первого контура внутри ЗО	2 Аварии с потерей теплоносителя 2.1.1 Разрыв трубопровода первого контура с невключением активной подсистемы САОЗ *(насосов подпитки первого контура).* 2.1.2 Разрыв трубопровода первого контура с отказом пассивной подсистемы САОЗ *(гидроаккумуляторов).* 2.1.3 Разрыв трубопровода одного из каналов САОЗ с невключением насосов второго канала. 2.1.4 Разрыв трубопровода первого контура с двухсторонним истечением (отказ локализующей арматуры в системе очистки) и невключением активной подсистемы САОЗ. 2.1.5 Разрыв трубопровода первого контура с неотключением баллонов ГВД. 2.1.6 Малая течь первого контура с полным обесточиванием - отказом всех источников переменного тока. 2.1.7 Разрыв трубопровода первого контура с полным обесточиванием - отказом всех источников переменного тока. 2.1.8 Разрыв трубопровода первого контура с незакрытием по автоматическим сигналам локализующей арматуры системы вентиляции защитной оболочки. 2.1.9 Обрыв стойки привода СУЗ.

Продолжение таблицы Б.4

2.2 Аварии с байпасированием ЗО	2.2.1 Разрыв трубки ПГ с незакрытием локализующей арматуры. 2.2.2 Разрыв парового трубопровода- коллектора ПГ с незакрытием локализующей арматуры. 2.2.3 Разгерметизация холодильника стойки привода СУЗ с незакрытием локализующей арматуры. 2.2.4 Разрыв трубки холодильника ЦНПК с незакрытием локализующей арматуры. 2.2.5 Разрыв трубки холодильника ЦНПК с неотключением баллонов ГВД. 2.2.6 Разрыв трубки теплообменника первого-третьего контуров с незакрытием локализующей арматуры. 2.2.7 Разрыв трубопровода отвода охлаждающей воды в тепло-обменнике первого-третьего контуров с незакрытием локализующей арматуры. 2.2.8 Разрыв трубопровода системы отбора проб с незакрытием локализующей арматуры на трубопроводах системы отбора проб и трубопроводах СОиР
2.3 Накопление потенциально взрывоопасной смеси в реакторе в аварии с выходом газа-разбавителя за пределы первого контура.	
	3 Аварии на остановленном реакторе и при обращении с ядерным топливом
3.1 Введение положительной реактивности	3.1.1 Несанкционированное извлечение одного РО КГ при проведении демонтажных работ на реакторе.
3.2 Нарушение теплоотвода от реактора	3.2.1 Полное обесточивание с отказом всех источников переменного тока при перегрузке. 3.2.2 Полное обесточивание с отказом всех источников переменного тока при ремонте оборудования (ПГ, ЦНПК, ЦНР, арматуры).
3.3 Аварии с разгерметизацией первого контура	3.3.1 Разрыв трубопровода КД с невключением активной подсистемы САОЗ в режиме поддержания реактора в горячем состоянии.

Продолжение таблицы Б.4

3.4 Аварии при перегрузке	3.4.1 Падение контейнера с ОТВС: 1) на реактор; 2) на хранилище отработавшего топлива. 3.4.2 Разрушение ОТВС при несанкционированном закрытии шибера контейнера или при повороте механизма наведения. 3.4.3 Падение контейнера с чехлом, загруженным ОТВС. 3.4.4 Падение контейнера со сборником отработавшей шихты (фильтра первого контура).
3.5 Аварии с хранилищем ОТВС	3.5.1 Отказ всех каналов системы охлаждения баков хранения ОТВС.
3.6 Выход радиолитических газов из открытого реактора в аварии с потерей его охлаждения *(при перегрузке топлива, при ремонте оборудования).*	
4 Внешние воздействия на ПЭБ 4.1 Столкновения ПЭБ с другими судами, идущими со скоростью выше критической. 4.2 Падение летательного аппарата на ПЭБ с большой высоты. 4.3 Затопление ПЭБ. 4.4 Посадка ПЭБ на мель, на скалистый грунт	

ВЕРОЯТНОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТОВ НЕ НИЖЕ ТРЕБУЕМЫХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЕЙСТВУЮЩИХ ДВУХ ПФ

1. Математическая модель

$$P = 1 - \int_{D_A}^{\infty}\int_{D_B}^{\infty} \frac{1}{2\pi\sigma_A\sigma_B\sqrt{1-r^2}\,\tilde{D}_A\tilde{D}_B} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{ln^2\frac{\tilde{D}_A}{D_{A,50}}}{\sigma_A^2} - 2r\frac{ln\frac{\tilde{D}_A}{D_{A,50}}\,ln\frac{\tilde{D}_B}{D_{B,50}}}{\sigma_A\sigma_B} + \frac{ln^2\frac{\tilde{D}_B}{D_{B,50}}}{\sigma_B^2}\right)} d\tilde{D}_A d\tilde{D}_B \quad (Б.2)$$

2. Графическое представление математической модели

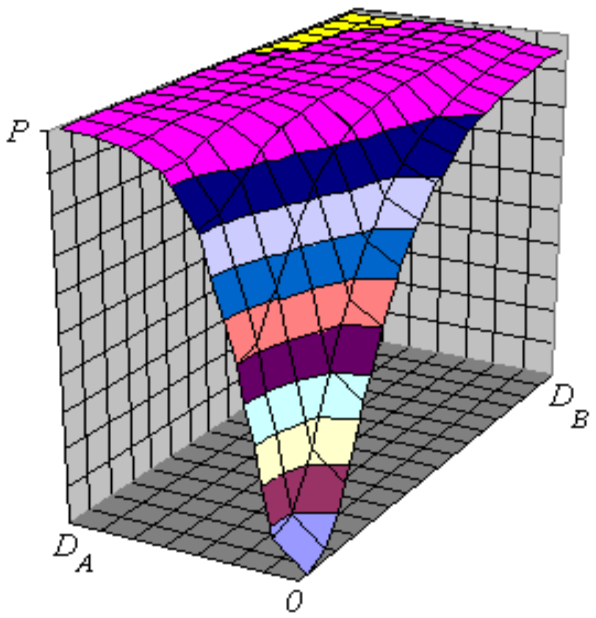

Рис. Б.1 - Графическое представление математической модели

$$u = \sqrt{k_A}\, ln\frac{D_A}{D_{50,A}} \quad (Б.3), \qquad v = \sqrt{k_B}\, ln\frac{D_B}{D_{50,B}} \quad (Б.4).$$

Приложение В

Исходные данные для проведения статистических исследований по определению параметров ФЗВ

В таблице В.1 представлены результаты испытаний для формирования выборки 1 при осколочном воздействии на преграду по разработанной методике № 1/19 проведения баллистических испытаний образцов на фиксированной скорости v_i.

Таблица В.1 - Выборка 1

Порядковый номер	Масса поражающего элемента, кг	Скорость поражающего элемента, м/с	Материал преграды	Деформация преграды, глубина внедрения, мм
1.	0,49	138	Доска сосновая	4,36
2.	0,49	131	Доска сосновая	6,9
3.	0,49	131	Доска сосновая	5.44
4.	0,49	132	Доска сосновая	4,65
5.	0,49	129	Доска сосновая	4,92
6.	0,49	131	Доска сосновая	незачет
7.	0,49	124	Доска сосновая	5,26
8.	0,49	119	Доска сосновая	6,62
9.	0,49	97	Доска сосновая	5,38
10.	0,49	127	Доска сосновая	4.59
11.	0,49	126	Доска сосновая	5,81
12.	0,49	129	Доска сосновая	4,96
13.	0,49	126	Доска сосновая	5,81
14.	0,49	101	Доска сосновая	4,5
15.	0,49	128	Доска сосновая	6,25
16.	0,49	125	Доска сосновая	4,65
17.	0,49	122	Доска сосновая	4,53
18.	0,49	128	Доска сосновая	5,97
19.	0,49	130	Доска сосновая	7,07
20.	0,49	127	Доска сосновая	4,85
21.	0.49	127	Доска сосновая	7,93
22.	0,49	113	Доска сосновая	незачет
23.	0,49	121	Доска сосновая	5,48
24.	0,49	122	Доска сосновая	6,37
25.	0,49	99	Доска сосновая	3,71
26.	0,49	106	Доска сосновая	5,63
27.	0,49	112	Доска сосновая	8,80
28.	0,49	122	Доска сосновая	3,60
29.	0,49	130	Доска сосновая	6,24
30.	0,49	128	Доска сосновая	7,87

В таблице В.2 представлены результаты испытаний для формирования выборки 2 при осколочном воздействии на преграду по разработанной методике № 1/19 проведения баллистических испытаний образцов на фиксированной скорости v_i.

Таблица В.2 - Выборка 2

Порядковый номер	Масса поражающего элемента, кг	Скорость поражающего элемента, м/с	Материал преграды	Деформация преграды, глубина внедрения, мм
1.	0,49	109	Доска сосновая	6,36
2.	0,49	119	Доска сосновая	3,34
3.	0,49	127	Доска сосновая	3,58
4.	0,49	122	Доска сосновая	3,69
5.	0,49	124	Доска сосновая	5.64
6.	0,49	125	Доска сосновая	6,44
7.	0,49	126	Доска сосновая	7,71
8.	0,49	128	Доска сосновая	5,25
9.	0,49	124	Доска сосновая	8,15
10.	0,49	121	Доска сосновая	7,73
11.	0,49	115	Доска сосновая	4,93
12.	0,49	125	Доска сосновая	7,3
13.	0,49	120	Доска сосновая	7,20
14.	0,49	123	Доска сосновая	9,36
15.	0,49	122	Доска сосновая	5,54
16.	0,49	128	Доска сосновая	9,61
17.	0,49	116	Доска сосновая	6,51
18.	0,49	126	Доска сосновая	7,62
19.	0,49	126	Доска сосновая	6,87
20.	0,49	127	Доска сосновая	7,86
21.	0.49	127	Доска сосновая	7,71
22.	0,49	124	Доска сосновая	8,45
23.	0,49	126	Доска сосновая	9,11
24.	0,49	122	Доска сосновая	8,17
25.	0,49	129	Доска сосновая	7,50
26.	0,49	118	Доска сосновая	5,39
27.	0,49	131	Доска сосновая	7,44
28.	0,49	107	Доска сосновая	незачет
29.	0,49	120	Доска сосновая	5,97
30.	0,49	130	Доска сосновая	9,81
31.	0.49	117	Доска сосновая	незачет
32.	0,49	131	Доска сосновая	8,53
33.	0,49	132	Доска сосновая	8,78
34.	0,49	131	Доска сосновая	7,47
35.	0,49	131	Доска сосновая	6,84

В таблице В.3 представлены результаты испытаний для формирования выборки 3 при осколочном воздействии на преграду по разработанной методике № 1/19 проведения баллистических испытаний образцов на фиксированной скорости v_i.

Таблица В.3 - Выборка 3

Порядковый номер	Масса поражающего элемента, кг	Скорость поражающего элемента, м/с	Материал преграды	Деформация преграды, глубина внедрения, мм
1.	0,49	127	Скульптурный пластилин	незачет
2.	0,49	121	Скульптурный пластилин	8,09
3.	0,49	124	Скульптурный пластилин	10,57
4.	0,49	131	Скульптурный пластилин	10,51
5.	0,49	125	Скульптурный пластилин	10,31
6.	0,49	130	Скульптурный пластилин	11,09
7.	0,49	131	Скульптурный пластилин	7,80
8.	0,49	131	Скульптурный пластилин	9,27
9.	0,49	129	Скульптурный пластилин	9,32

В таблице В.4 представлены результаты испытаний для формирования выборки 4 при осколочном воздействии на преграду по разработанной методике № 1/19 проведения баллистических испытаний образцов при разных скоростях осколка.

Таблица В.4 - Выборка 4

Порядковый номер	Масса поражающего элемента, кг	Скорость поражающего элемента, м/с	Материал преграды	Деформация преграды, глубина внедрения, мм	Деформация преграды, диаметр миделя, мм
1.	0,49	113	Доска сосновая	отскок	
2.	0,49	144	Доска сосновая	6	
3.	0,49	194	Доска сосновая	12	
4.	0,49	213	Доска сосновая	18	
5.	0,49	268	Доска сосновая	25	
6.	0,49	301	Доска сосновая	31	
7.	0,49	364	Доска сосновая	37	
8.	0,49	406	Доска сосновая	50	
9.	0.49	413	Доска сосновая	50	
10.	0,49	479	Доска сосновая	75	
11.	0,49	532	Доска сосновая	81	
12.	0,49	563	Доска сосновая	87	
13.	0,49	574	Доска сосновая	94	
14.	0,49	610	Доска сосновая	100	
15.	0,49	635	Доска сосновая	100	

В таблице В.5 представлены результаты испытаний при осколочном воздействии на преграду по разработанной методике № 1/19 проведения баллистических испытаний образцов на фиксированной скорости v_i.

Таблица В.5 - Выборка 5 (скорость осколка 180 м/с)

№ пп	Глубина внедрения, x, mm	№ пп	Глубина внедрения, x, mm	№ пп	Глубина внедрения, x, mm	№ пп	Глубина внедрения, x, mm
1	15,04	16	19,00	31	16,23	46	18,13
2	15,49	17	17,07	32	14,96	47	17,48
3	15,80	18	15,63	33	16,66	48	15,76
4	14,66	19	17,51	34	18,34	49	16,77
5	14,86	20	17,21	35	16,64	50	16,61
6	13,50	21	16,61	36	15,76	51	15,58
7	16,60	22	16,38	37	15,73	52	
8	17,72	23	16,89	38	15,81	53	
9	14,24	24	17,35	39	14,65	54	
10	18,65	25	17,93	40	16,74	55	
11	17,32	26	17,55	41	16,89	56	
12	19,20	27	16,63	42	16,57	57	
13	17,37	28	16,94	43	17,33	58	
14	20,16	29	15,82	44	18,36	59	
15	18,46	30	13,61	45	18,06	60	

Приложение Г

Проверка гипотезы о виде распределения по критерию Колмогорова в среде MathCAD

Проверим согласуется ли эмпирическое распределение с заданным непрерывным теоретическим распределением, например, нормальным. Критерий Колмогорова рассчитывается по формуле в соответствии с [237]:

$$\lambda n := Dn \cdot \sqrt{n} \qquad (Г.1)$$

Для логнормального распределения:

$$\lambda l := Dl \cdot \sqrt{n} \qquad (Г.2)$$

Критические значения для статистики $\lambda_{кр}$ приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 - Критические значения для статистики $\lambda_{кр}$ [237]

α	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
$\lambda_{кр}$	0.89	0.97	1.07	1.22	1.36	1.48	1.63	1.73	1.95	2.03

В данном случае критерий Колмогорова используется для проверки гипотезы о принадлежности наблюдаемой выборки нормальному, логнормальному закону или закону Вейбулла-Гнеденко, параметры которого оцениваются по этой самой выборке методом максимального правдоподобия. То есть, проверяется сложная гипотеза и в качестве оценки параметров нормального закона используется выборочные оценки среднего и дисперсии.

В этом случае в соответствии с Hubert W.Lilliefors [239] использовались модифицированные статистики вида:

$$\lambda_z = D_n(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}) \qquad (Г.3)$$

Необходимо отметить, что критические значения для статистики λ_кр (табл. Г.1) уже нельзя использовать [237-239]. Критические значения для статистики λ_z приведены в таблице Г.2.

Таблица Г.2 - Критические значения для статистики λ_z[239]

α	0.15	0.10	0.05	0.03	0.01
$\lambda_{кр}$	0.775	0.819	0.895	0.955	1.035

Определим критерий согласия Колмогорова и модифицированный критерий согласия Колмогорова для выборки 1. Исходные данные взяты из приложения В. Математическое ожидание $m = 5.58$. Среднеквадратическое отклонение $\sigma = 1.329$. Ниже представлено описание производимых вычислений по получению статистики Колмогорова в среде и в обозначениях MathCAD.

$ORIGIN := 1$

$n := 27$

$i := 1..n$

$x := 2, 2.1..10$

$Pe_i := \frac{i}{n}$

$Fe := 1 - Pe$

$m := mean(V)$

$m = 5.58$

$\sigma := Stdev(V)$

$\sigma = 1.329$

Для нормального распределения

$Fn(x) := pnorm(x, m, \sigma)$

$Fne_i := Fn(V_i)$

$\Delta Fn_i := Fe_i - Fne_i$

$Dn := max(|\Delta Fn|)$

$Dn = 0.239$

$\lambda n := Dn \cdot \sqrt{n}$

$\lambda n = 1.241$

Для логнормального распределения

$y := ln(V)$

$lm := mean(y)$

$lm = 1.693$

$l\sigma := Stdev(y)$

$l\sigma = 0.232$

$Fl(xo) := plnorm(xo, lm, l\sigma)$

$Fle_i := Fl(V_i)$

$\Delta Fl_i := Fe_i - Fle_i$

$Dl := max(|\Delta Fl|)$

$Dl = 0.176$

$\lambda l := Dl \cdot \sqrt{n}$

$\lambda l = 0.913$

Модифицированный критерий согласия Колмогорова для нормального распределения

$$\lambda nz := Dn \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$$

$\lambda nz = 1.278$

Модифицированный критерий согласия Колмогорова для логарифмически нормального распределения

$$\lambda lz := Dl \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$$

$$\lambda lz = 0.94$$

Для распределения Вейбулла-Гнеденко

$$f(x, \alpha, q) := \alpha \cdot exp[-\alpha \cdot (x - q) - exp[-\alpha \cdot (x - q)]]$$

$$\alpha o := \frac{1}{\sigma}$$

$$qo := m$$

$$\alpha o = 0.752$$

Given

$$m = \int_0^{100} x \cdot f(x, \alpha o, qo)\, dx$$

$$\sigma^2 = \int_0^{100} (x - m)^2 \cdot f(x, \alpha o, qo)\, dx$$

$$Find(\alpha o, qo) = \begin{pmatrix} 0.965 \\ 4.982 \end{pmatrix}$$

$$\alpha o := 0.965$$

$$qo := 4.982$$

$$fv(x) := \alpha o \cdot exp[-\alpha o \cdot (x - qo) - exp[-\alpha o \cdot (x - qo)]]$$

$$Fv1(x) := \int_1^x fv(t)\, dt$$

$$Fv1(5) = 0.374$$

$$Fve_i := Fv1\left(V_i\right)$$

$$\Delta Fv_i := Fe_i - Fve_i$$

$$Dv := max\left(\left|\Delta Fv\right|\right)$$

$$Dv = 0.181$$

$$\lambda zv := Dv \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$$

$$\lambda zv = 0.971$$

$$S2n := \sum_{i=1}^{n} \left(\Delta Fn_i\right)^2$$

$$S2n = 0.0571$$

$$S2l := \sum_{i=1}^{n} \left(\Delta Fl_i\right)^2$$

$$S2l = 0.03085$$

$$S2v := \sum_{i=1}^{n} \left(\Delta Fv_i\right)^2$$

$$S2v = 0.03291$$

На рис. Г. 1 представлены графики интегральной теоретической и эмпирической функции распределения для выборки 1.

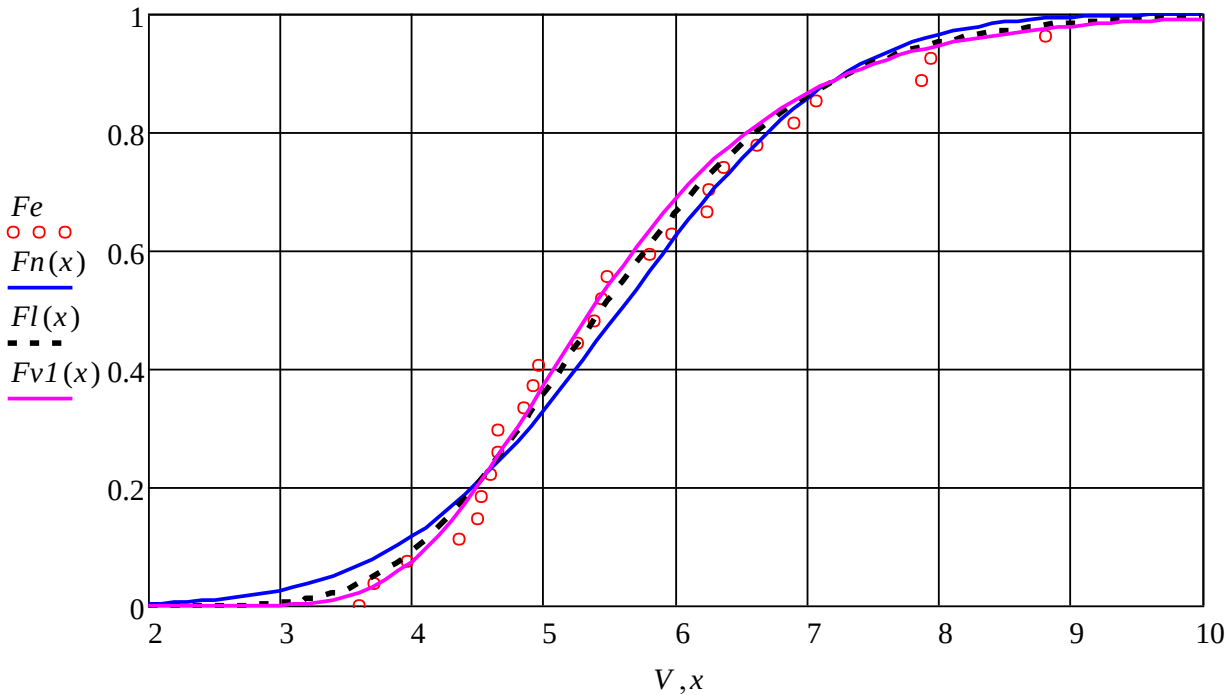

Рис. Г. 1 - Графики интегральной теоретической и эмпирической функции распределения для выборки 1

Определим критерий согласия Колмогорова для выборки 2. Данные взяты из приложения В.

$ORIGIN := 1$

$n := 33$

$i := 1..n$

$x := 2, 2.1..10$

$V_i := V1_{n-i+1}$

$Pe_i := \frac{i}{n}$

$Fe := 1 - Pe$

$m := mean(V)$

$m = 7.026$

$\sigma := Stdev(V)$

$\sigma = 1.682$

Для нормального распределения

$Fn(x) := pnorm(x, m, \sigma)$

$Fne_i := Fn(V_i)$

$\Delta Fn_i := Fe_i - Fne_i$

$Dn := max(|\Delta Fn|)$

$Dn = 0.295$

$\lambda n := Dn \cdot \sqrt{n}$

$\lambda n = 1.692$

Для логнормального распределения

$y := ln(V)$

$lm := mean(y)$

$lm = 1.917$

$l\sigma := Stdev(y)$

$l\sigma = 0.274$

$Fl(xo) := plnorm(xo, lm, l\sigma)$

$Fle_i := Fl(V_i)$

$\Delta Fl_i := Fe_i - Fle_i$

$Dl := max(|\Delta Fl|)$

$Dl = 0.458$

$\lambda l := Dl \cdot \sqrt{n}$

$\lambda l = 2.629$

Модифицированный критерий согласия Колмогорова для нормального распределения

$$\lambda nz := Dn \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$$

$$\lambda nz = 1.733$$

Модифицированный критерий согласия Колмогорова для логарифмически нормального распределения

$$\lambda lz := Dl \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$$

$$\lambda lz = 2.692$$

Для распределения Вейбулла-Гнеденко

$$f(x, \alpha, q) := \alpha \cdot exp[-\alpha \cdot (x - q) - exp[-\alpha \cdot (x - q)]]$$

$$\alpha o := \frac{1}{\sigma}$$

$$qo := m$$

$$\alpha o = 0.595$$

Given

$$m = \int_0^{100} x \cdot f(x, \alpha o, qo)\, dx$$

$$\sigma^2 = \int_0^{100} (x - m)^2 \cdot f(x, \alpha o, qo)\, dx$$

$$Find(\alpha o, qo) = \begin{pmatrix} 0.763 \\ 6.269 \end{pmatrix}$$

$$\alpha o := 0.763$$

$qo := 6.269$

$fv(x) := \alpha o \cdot exp[-\alpha o \cdot (x - qo) - exp[-\alpha o \cdot (x - qo)]]$

$Fv1(x) := \int_1^x fv(t)\,dt$

$Fv1(5) = 0.072$

$Fve_i := Fv1(V_i)$

$\Delta Fv_i := Fe_i - Fve_i$

$Dv := max(|\Delta Fv|)$

$Dv = 0.527$

$\lambda zv := Dv \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$

$\lambda zv = 3.102$

$S2n := \sum_{i=1}^{n} (\Delta Fn_i)^2$

$S2n = 0.0868$

$S2l := \sum_{i=1}^{n} (\Delta Fl_i)^2$

$S2l = 0.20937$

$S2v := \sum_{i=1}^{n} (\Delta Fv_i)^2$

$S2v = 0.27814$

На рис. Г. 2 представлены графики интегральной теоретической и эмпирической функции распределения для выборки 2.

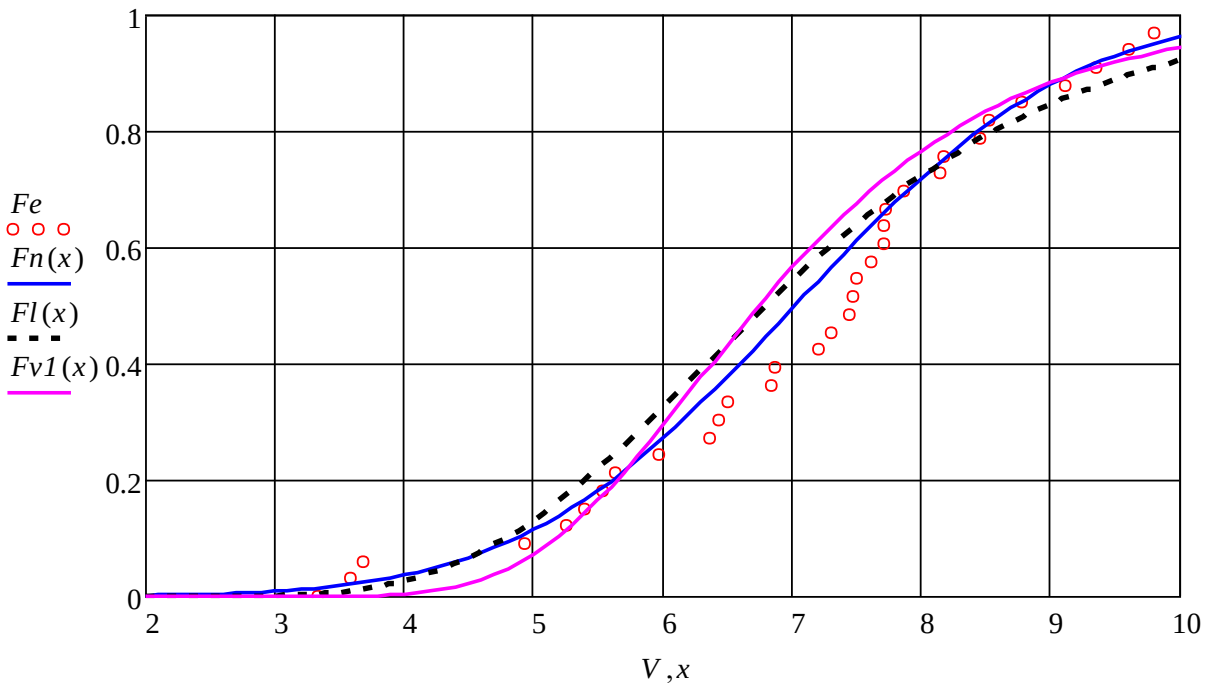

Рис. Г. 2 - Графики интегральной теоретической и эмпирической функции распределения для выборки 2

Определим критерий согласия Колмогорова для выборки 5. Исходные данные взяты из приложения В.

$ORIGIN := 1$

$n := 51$

$i := 1..n$

$x := 10, 10.1..25$

$Pe_i := \frac{i}{n}$

$Fe := 1 - Pe$

$m := mean(V)$

$m = 16.672$

$\sigma := Stdev(V)$

$\sigma = 1.408$

Для нормального распределения

$Fn(x) := pnorm(x, m, \sigma)$

$Fne_i := Fn(V_i)$

$\Delta Fn_i := Fe_i - Fne_i$

$Dn := max(|\Delta Fn|)$

$Dn = 0.218$

$\lambda n := Dn \cdot \sqrt{n}$

$\lambda n = 1.558$

Для логнормального распределения

$y := ln(V)$

$lm := mean(y)$

$lm = 2.81$

$l\sigma := Stdev(y)$

$l\sigma = 0.085$

$Fl(xo) := plnorm(xo, lm, l\sigma)$

$Fle_i := Fl(V_i)$

$\Delta Fl_i := Fe_i - Fle_i$

$Dl := max(|\Delta Fl|)$

$Dl = 0.265$

$\lambda l := Dl \cdot \sqrt{n}$

$\lambda l = 1.892$

Модифицированный критерий согласия Колмогорова для нормального распределения

$$\lambda nz := Dn \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$$

$$\lambda nz = 1.582$$

Модифицированный критерий согласия Колмогорова для логарифмически нормального распределения

$$\lambda lz := Dl \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$$

$$\lambda lz = 1.921$$

Для распределения Вейбулла-Гнеденко

$$f(x, \alpha, q) := \alpha \cdot exp[-\alpha \cdot (x - q) - exp[-\alpha \cdot (x - q)]]$$

$$\alpha o := \frac{1}{\sigma}$$

$$qo := m$$

$$\alpha o = 0.71$$

Given

$$m = \int_0^{100} x \cdot f(x, \alpha o, qo)\, dx$$

$$\sigma^2 = \int_0^{100} (x - m)^2 \cdot f(x, \alpha o, qo)\, dx$$

$$Solution := Find(\alpha o, qo)$$

$$\alpha o := \left|\left(Solution^T\right)^{\langle 1 \rangle}\right|$$

$$qo := \left|\left(Solution^T\right)^{\langle 2 \rangle}\right|$$

$$fy(x) := \alpha o \cdot exp[-\alpha o \cdot (x - qo) - exp[-\alpha o \cdot (x - qo)]]$$

$$Fv1(x) := \int_1^x fv(t)\,dt$$

$$Fve_i := Fv1(V_i)$$

$$\Delta Fv_i := Fe_i - Fve_i$$

$$Dv := max(|\Delta Fv|)$$

$$Dv = 0.468$$

$$\lambda zv := Dv \cdot \left(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}\right)$$

$$\lambda zv = 3.39$$

$$S2n := \sum_{i=1}^{n} (\Delta Fn_i)^2$$

$$S2n = 0.0476$$

$$S2l := \sum_{i=1}^{n} (\Delta Fl_i)^2$$

$$S2l = 0.07019$$

$$S2v := \sum_{i=1}^{n} (\Delta Fv_i)^2$$

$$S2v = 0.21865$$

На рис. Г. 3 представлены графики интегральной теоретической и эмпирической функции распределения для выборки 5.

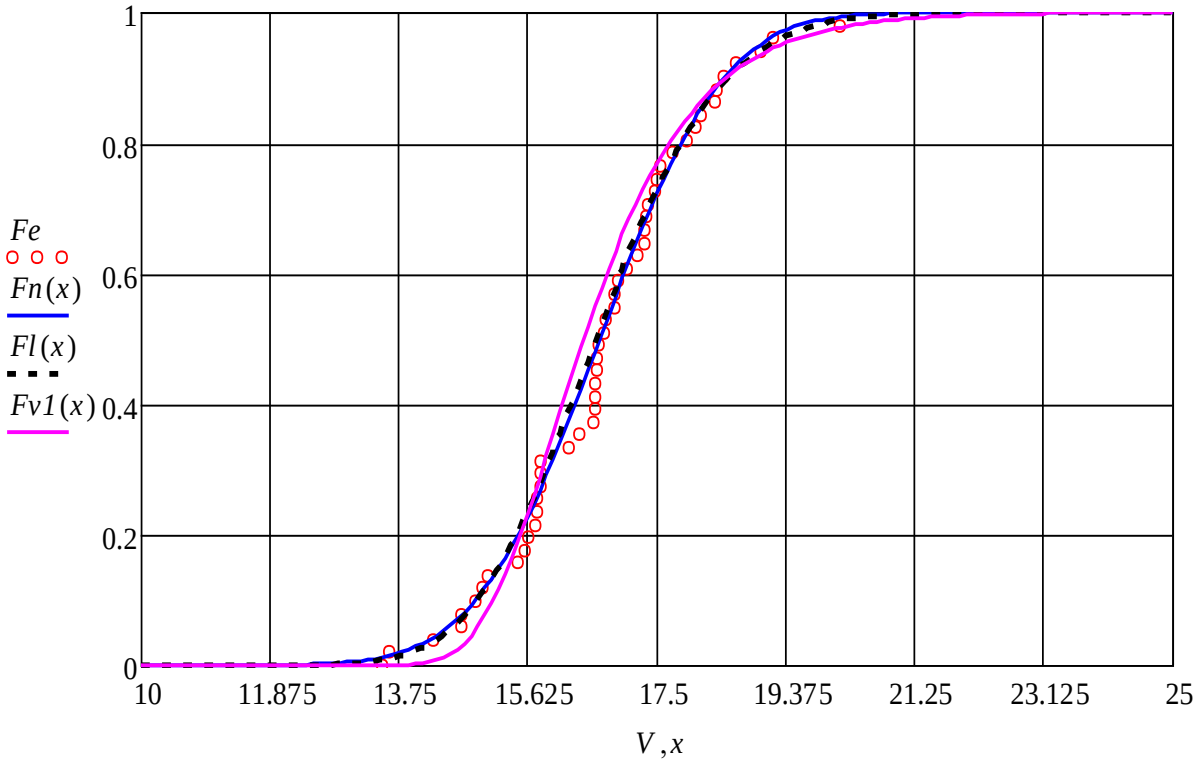

Рис. Г. 3 - Графики интегральной теоретической и эмпирической функции распределения для выборки 5