

На правах рукописи



КОЛЕСНИКОВ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ

**НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ОЦЕНОК АВАРИЙНОГО РИСКА
ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Йошкар-Ола 2020

Работа выполнена на кафедре «Проектирование зданий»
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет».

Научный консультант доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РТ
Теляков Эдуард Шархиевич

Официальные оппоненты: **Барбин Николай Михайлович**,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уральский институт ГПС МЧС
России» / ведущий научный сотрудник

Махутов Николай Андреевич,
доктор технических наук, профессор
Общество с ограниченной ответственностью
«НИИ «Транснефть» / главный научный со-
трудник, чл. корр. РАН

Федоров Андрей Владимирович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Академия ГПС МЧС России» /
кафедра пожарной автоматики / профессор

Ведущая организация ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г. Москва

Защита состоится «16» июня 2020 г. в 10.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО "Уфимский
государственный нефтяной технический университет" по адресу: 450062,
Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО "Уфимский
государственный нефтяной технический университет" и на сайте
<http://www.rusoil.net/>

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Основанная на риске методология управления пожарной и промышленной безопасностью, наряду с важными достоинствами, обладает рядом серьезных изъянов и нерешенных проблем. Ключевой считается проблема существования и количественной оценки неопределенности (КОН) показателей риска. Эта неопределенность проявляет себя, например, в ситуации, когда результаты количественной оценки аварийного (пожарного) рисков (КОР) для одного и того же взрывопожароопасного объекта (ВПОО), полученные разными экспертами, существенно различаются. Подобное наблюдалось, например, на производстве поликарбонатов и заводе полиэтилена низкого давления ПАО "Казаньоргсинтез", а также заводе по производству бензинов ОАО "Таиф-НК". Ситуация усугубляется тем, что результаты КОР принято выражать точечными (скалярными) числами, что создает иллюзию точности оценок. На самом деле в силу ряда объективных и субъективных обстоятельств, результаты КОР всегда являют собой интервалы. В таких случаях неопределенность параметров риска носит скрытый характер, что и позволяет недобросовестным проектировщикам (или экспертам) получать нужные им значения целевых параметров (метрик) аварийного (пожарного) риска. Подобное имеет место при разработке и экспертизе деклараций промышленной, пожарной безопасности, обоснований промышленной безопасности и специальных технических условий на объекты строительства. Кроме того, выполнение КОР с учетом неопределенности в силу большей информативности способствует принятию более обоснованных управленческих решений по пожарной и промышленной безопасности в рамках риск-ориентированного подхода.

Степень разработанности темы

Приходится с сожалением констатировать, что проблема наличия неопределенности показателей аварийного (пожарного) риска и методы ее количественного оценивания в России исследованы недостаточно. Число публикаций на русском языке по данной тематике мало, что резко контрастирует с сотнями работ (Руководств, отчетов, диссертаций, монографий, статей), опубликованных на английском языке. Наибольшей проработанностью проблемы КОН отличаются "цветные" книги нидерландской TNO (CPR-12E, CPR-18E), Руководство по количественной оценке риска в химической промышленности американского института инженеров-химиков (AIChE), документы по ядерной безопасности США (NUREG-1855, RG 1.174, ASME/ANS RA-Sa-2009 и др.), отчеты SANDIA NL.

Проблематике неопределенности в теории риск-анализа посвящены работы таких отечественных и зарубежных исследователей, как О.М.Ковалевич,

В.А.Острейковский, Ю.В.Швыряев, М.В.Лисанов, Е.А.Кузьмин, Н.Н.Радаев, В.П.Щербина, С.А.Шевченко, Фрэнк Найт, Норманн Расмуссен, Грандер М.Морган, Макс Хенрион, Деннис В.Линдли, Авен Терье, Тим Бедфорт, Роджер Кук, Этьен де Роскини, Дэвид Воуз, Вильям М. Оберкамп, Скотт Ферсон, Лев Р. Гинзбург и др.

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

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

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

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности ВАК РФ 05.26.03 – "Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль)": п. 4 – Исследование условий и разработка методов управления риском для обеспечения безопасности при технологических процессах, утилизации, нейтрализации, складировании и регенерации отходов деятельности предприятий.

Цель и задачи работы

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

Для достижения поставленной цели следовало решить следующие задачи:

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

2 Для каждого ее этапа, проанализировав действующие Руководства по КОР и МЧС России и Ростехнадзора, выявить имеющиеся источники неопределенности терминологического, модельного и параметрического типов. Получить в результате перечень источников неопределенности, действующей отечественной нормативно-методической базы КОР, порождающих неопределенность метрик аварийного (пожарного) риска ВПОО нефтегазовой отрасли и сформировать предложения по их устранению.

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

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

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

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

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

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1 Разработана и обоснована новая классификация источников неопределенности процедуры количественной оценки аварийного риска путем добавления нового типа вычислительной неопределенности и шести подтипов, позволившая выявить источники неопределенности отечественной нормативно-методической базы данной процедуры для взрывопожароопасных объектов, вызывающие значительный разброс ре-

зультатов оценки риска при ее выполнении в традиционной дискретной постановке; разработаны меры, позволяющие эту неопределенность уменьшить.

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

3 Впервые разработан интервально-матричный метод количественной оценки аварийного риска взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли, позволяющий эффективно управлять риском на всех стадиях жизненного цикла этих объектов через сравнение результатов расчета риска для альтернативных проектных решений, в отличие от вычисления аварийных рисков в традиционной дискретной постановке, не учитывающей наличие параметрической неопределенности.

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

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

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

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

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что разработанные в ней научные основы методов анализа и количественной оценки неопределенности

при управлении аварийным риском, выявляя источники неопределенности действующей отечественной нормативно-методической базы КОР и учитывая наличие параметрической неопределенности в используемых физико-математических моделях взрывов и пожаров, позволяют совершенствовать риск-ориентированный подход к управлению пожарной и промышленной безопасностью ВПОО нефтегазовой отрасли. В рамках риск-ориентированного подхода процесс управления пожарной или промышленной безопасностью ВПОО нефтегазового отрасли заключается в том, что на любой стадии жизненного цикла этих объектов, разработке для них обоснований промышленной безопасности или специальных технических условий выбирается то альтернативное проектное решение, которому соответствует минимальный по величине рассчитанный целевой показатель аварийного (пожарного) риска. Этот целевой параметр рассчитывается разработанным в диссертации интервально-матричным методом, учитывающим наличие параметрической неопределенности, что делает процесс выбора проектного решения (управления риском) максимально реалистичным и информационно обеспеченным.

Практическое значение результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

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

- реконструкции производства галлобутилкаучуков (расширении сливно-наливных терминалов);
- производство метилхлорсиланов ОАО "КЗСК-Силикон";
- строительстве цеха короткоцикловой адсорбции ОАО "Казаньоргсинтез";

а также ООО "Эксперт-бюро" при разработке проектной документации для ряда опасных производственных объектов нефтехимической отрасли.

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

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

Методология и методы исследования

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

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

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

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

Положения, выносимые на защиту

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

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

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

а) непосредственную количественную оценку неопределенности результатов расчета;

б) быструю оценку значимости параметров используемых физико-математических моделей аварийных процессов;

в) оценку консервативности принимаемых допущений.

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

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

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

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

Степень достоверности и апробация результатов

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

Результаты работы докладывались и обсуждались: на международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы современных наук", Przemysl, 14 – 15 июня 2012 г.; научно-практической конференции "Приоритетные направления развития науки в области управления рисками на современном этапе", Москва, 22 октября 2013 г.; V-й международной научно-практической конференции "Пожарная безопасность: проблемы и перспективы", Воронеж, 18 – 19 сентября 2014 г.; Twelfth international scientific school "Modeling and analysis of safety and risk in complex systems" (MA SR – 2014). Санкт-Петербург, 18 – 20 ноября 2014 г.; заседании научно-технического совета при Министерстве по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям Республики Татарстан. Казань, 18 февраля 2015 г.; XX-й междуна-

родной научно-практической конференции "Глобальная и национальная стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий". Москва, 19 – 21 мая 2015 г.; Всероссийской научно-практической конференции "Анализ риска – 2015: проблемы теории и практики". Йошкар-Ола, 27 мая 2015 г. Всероссийской научно-практической конференции "Человек, общество и государство в обеспечении безопасности жизнедеятельности современной России". Москва, 23 октября 2018.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 34 работы, из них: одна монография, 27 статей в отечественных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, одна статья в зарубежном журнале и четыре – в сборниках трудов международных и всероссийских научных конференций.

Структура и объем работы

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена цель и сформулированы основные задачи работы, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимости проведенных исследований, обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализировано современное состояние дел в области трактовки соотношения между понятиями *неопределенность* и *риск*, понимания природы основных источников неопределенности параметров техногенного риска, подходов к анализу и методов количественной оценке этой неопределенности.

Понятие *неопределенность*, служащее для качественной оценки современных представлений о предмете и характеризующее их неполноту, неточность, неоднозначность, несомненно, стало использоваться в науке намного раньше, чем понятие *риск*. В теории экономического (финансового, инвестиционного) риска – это понятие используется исключительно в качественном смысле. Однако именно в теории риска, при анализе результатов количественных оценок, полученных теоретическими методами, неопределенность приобрела количественный аспект.

Теория анализа техногенного риска (АТР) – научная область, претендующая на роль теоретического базиса риск-ориентированного подхода к управлению пожарной и промышленной безопасностью и стремящаяся соответствовать стандартам естественнонаучной дисциплины. Однако огромная сложность предмета этой науки вынуждает в ряде случаев при прогнозировании ситуации вместо математического моделирования ис-

пользовать экспертные суждения. Это происходит как из-за отсутствия удовлетворительных теоретических моделей, так и точной исходной информации.

Использование подобных методов, находящихся вне рамок естествознания, не позволяет многим специалистам относить АТР к области "hard science" (классической науки).

Учитывая, что целью КОР является получение количественных показателей риска (метрик, индикаторов), оценивающих пожарную (промышленную) безопасность взрывопожароопасных объектов путем выполнения расчетов по определенным математическим моделям (а также привлечения экспертных суждений), неопределенность показателей риска используется как *количественная* мера возможного разброса полученных величин.

Этот разброс обусловлен как *объективными*, так и *субъективными* причинами. С одной стороны, поскольку время начала аварии (пожара, взрыва, выброса опасного вещества) заранее неизвестно (если это не диверсия), невозможно точно задать величину важнейших параметров задачи, таких как метеорологические условия, энергетический потенциал выброса горючего вещества, местоположение персонала и подвижных объектов и т.д. Очевидно, что это фактор объективный. С другой стороны, привлекаемые физико-математические модели взрывов и пожаров, рассеивания выбросов обладают ограниченной точностью и областью применимости, ряд их параметров точно неизвестен. Это фактор субъективной природы. Между ними существует важнейшее различие – объективная неопределенность неустранима в принципе, поскольку порождается изменчивостью Природы, в то время как субъективная неопределенность при получении нового знания может быть уменьшена, теоретически до нуля.

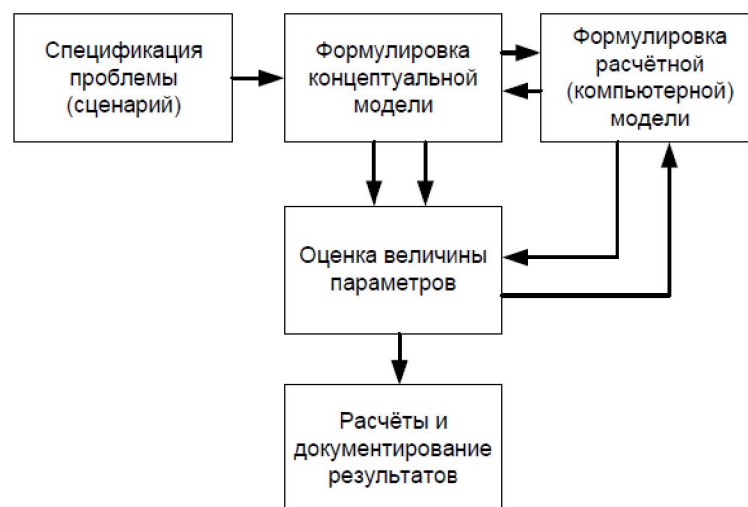


Рисунок 1 – Этапы решения задачи, влияющие на точность результатов моделирования

Неопределенность является атрибутом, т.е. неотъемлемым свойством любого параметра, характеризующего риск. В силу этого результаты количественной оценки параметров аварийного и пожарного рисков в подавляющем большинстве случаев будут являться не точечными числами, а некоторыми интервалами, характеризующими диапазон возможных значений, которые обоснованно могут быть им приписаны.

В современной метрологии подобный интервал принято характеризовать величиной *измерительной неопределенности*. Таким образом, количественный аспект неопределенности в теории АТР в целом соответствует трактовке неопределенности результатов измерений в современной метрологии. В ней понятие *неопределенность* также используется в обоих смыслах.

Для количественной оценки интервала неопределенности в метрологии используется фактор ошибки EF.

Следует отметить, что уже в 80-годах прошлого века в Западной Европе понимали необходимость количественной оценки неопределенности. В качестве источников неопределенности в Руководстве по КОР CPR-12E, разработанном нидерландской организацией прикладных исследований (TNO), перечислялись: а) допущения о распределении людей на территории зоны поражения; б) исключение из рассмотрения некоторых сценариев аварии; в) оценка вероятности токсического поражения человека по зависимостям "доза-эффект" и др.

Важная для лучшего понимания природы неопределенности результатов КОР идея, по-видимому, впервые была сформулирована в отчете МАГАТЭ № 100 серии "Безопасность", подготовленном в 1989 году. Она заключалась в выделении объективной, стохастической (*aleatory*) и субъективной, познавательной, т.е. обусловленной состоянием знаний о предмете (*epistemic*).

Говоря о классификации источников неопределенности, исторически Руководства по КОР дифференцировали два их основных типа – модельный и параметрический. Первый из них имеет субъективную природу и обусловлен альтернативностью в описании, моделировании аварийных процессов. Для второго обычно предполагается объективное происхождение, обусловленное изменчивостью свойств опасного объекта и окружающей его обстановки.

Третий, очень значимый тип неопределенности был идентифицирован позже, он сопряжен с процессом оценивания экспертом аварийного риска, трактовки им результатов расчетов, моделирования. Эта *терминологическая (коммуникативная)* неопределенность, возникающая из-за того, что люди воспринимают любую информацию в соответствии со своими представлениями и установками, полученным образованием. Во второй главе диссертации показано, что в ряде случаев вклад терминологической неопределенности в общий бюджет неопределенности очень заметен.

Кроме того, при выполнении КОР на ПЭВМ с использованием методов приближенных вычислений возникает дополнительная неопределенность, аккумулирующая неточности, обусловленные округлениями, отбрасыванием некоторых членов ряда, использованием чисел с плавающей запятой и прочим особенностям этих методов. Особая ее разновидность присуща интервальным вычислениям. В случае непринятия мер противодействия интервальные числа, являющиеся результатами интервальных расчетов, могут обладать такой шириной, что они не будут представлять какого-либо практического интереса для целей КОР.

Проблема оценки неопределенности результатов КОР за рубежом впервые была поставлена в повестку дня около пятидесяти лет назад, с тех пор там проводится интенсивный научный поиск путей ее решения. Публикаций на русском языке по тематике неопределенности немного, подавляющая их часть посвящена соотношению "риск – неопределенность" в экономической области: инвестиционном и страховом деле, банковском бизнесе и т.п. В отечественных Руководствах по КОР даны лишь общие рекомендации о выполнении количественной оценки неопределенности результатов количественной оценки риска, какие-либо практические рекомендации о том, как ее выполнять, в них отсутствуют.

В целом для выполнения КОН используют качественные, полуколичественные и количественные методы. С классической точки зрения последние принято делить на вероятностные и детерминированные, хотя в последнее время предложен и ряд гибридных методов КОН.

Вторая глава диссертации посвящена анализу и идентификации источников неопределенности, сопровождающих каждый этап процедуры КОР. После анализа действующей отечественной нормативно-методической базы КОР сформулирована универсальная процедура ее выполнения, имеющая пять основных этапов:

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

Предложена новая классификация источников неопределенности – введен новый тип вычислительной неопределенности; для ее модельного и параметрического типов дифференцированы по три подтипа: а) для модельного типа они названы сценарным, концептуальным и аппроксимационным подтипами; б) параметрического – природно-эксплуатационным, модельным и смешанным. Сценарный подтип обусловлен различ-

ными перечнями сценариев аварии, принятых к рассмотрению на данном взрывопожароопасном объекте (либо по рекомендации используемого Руководства по КОР, либо по усмотрению исполнителя). Сценарная неопределенность способна породить очень значительное различие результатов КОР.

Концептуальный подтип обусловлен различными физическими принципами, положенными в основу моделирования тех или иных аварийных процессов. Например, моделирование испарения пролива опасного вещества на открытой местности возможно на основе механизма молекулярной или турбулентной диффузии, поток теплового излучения пламени может моделироваться точечным излучательным центром или с применением твердотельной модели.

Аппроксимационный подтип связан с учетом или неучетом некоторых эффектов (например, удлинением основания пламени под действием ветра, гравитационным всплыванием факела, влияния концентрации углекислого газа в атмосфере на поглощение потока инфракрасного излучения и т.д.). Также к аппроксимационному подтипу относится, например, использование различными Руководствами по КОР разных коэффициентов пробит-функций, описывающих одинаковые эффекты поражения.

Неопределенность источника природно-эксплуатационного подтипа параметрического типа имеет объективную природу и связана с изменчивостью свойств опасного объекта и окружающей его обстановки в момент аварии (метеоусловий, параметров технологического режима и т.п.).

Модельный подтип, напротив, субъективен – ему принадлежит, например, неопределенность величины коэффициентов модельных уравнений.

К смешанному подтипу отнесены источники неопределенности двойкой природы, такие как физико-химические свойства автомобильных бензинов. Объективный фактор здесь обусловлен различием сырья (сырой нефти), технологий нефтеперегонных заводов, субъективный – недостаточностью справочных, литературных данных о некоторых их свойствах.

Во второй главе диссертации идентифицированы источники неопределенности всех этапов КОР – терминологического, модельного и параметрического типов (для двух последних – каждого из их трех подтипов). Это очень важно для ясного понимания, каково происхождение неопределенности при выполнении КОР и, что еще важнее, какие меры можно предпринять, чтобы ее уменьшить.

Для первого этапа проанализированы альтернативные подходы к оценке вероятности головного события аварии, показано, что она сопряжена с большой неопределенностью. В итоге идентифицированы следующие источники неопределенности:

- *терминологического типа*: отсутствие в Руководствах по КОР однозначного толкования терминов "критическое" давление и "критическая" температура. Как из-

вестно, возможны их термодинамическая и гидродинамическая трактовки. Поскольку это специально не оговорено, возможно разное понимание данных терминов, которое приведет к различающимся результатам;

- *модельного типа:*

- *сценарного подтипа* – наличие альтернативности, заключающейся в учете/неучете различными Руководствами по КОР возможности перелива жидкости через обвалование при квазимгновенном разрушении резервуара с ЛВЖ, что способно привести к существенному различию оценок площади пролива;

- *концептуального подтипа:*

- уравнение, рекомендуемое некоторыми Руководствами по КОР для расчета давления насыщенного пара, не может быть использовано для многокомпонентных технических смесей (типа бензина), поскольку для них отсутствуют точные значения таких параметров, как "температура кипения" T_b и "удельная теплота парообразования" ΔH_b . Предпочтительнее использовать для этих целей корреляцию Антуана, рекомендуемую документами МЧС России;

- неучет типа резервуара (с горизонтальными – РГС, или вертикальными – РВС, стенками) при задании параметров его надежности. Прочность этих резервуаров при воздействии внутреннего давления сильно различается, поэтому отсутствие указания типа резервуара создает значительную неопределенность;

- *параметрического типа:*

- *модельного подтипа* – во второй главе в табличной форме продемонстрирован большой разброс в опубликованных справочных данных о величине таких параметров, как интенсивность отказов оборудования, коэффициент истечения жидкости из аварийного отверстия, глубина слоя неограниченного пролива ЛВЖ. С целью уменьшения неопределенности есть необходимость издания унифицированных справочных данных данного типа.

Для второго этапа процедуры КОР в диссертации подчеркнуто, что в общем случае перечень возможных сценариев развития аварии различается для разных вариантов ее головного события. На втором этапе очень значима эпистемическая неопределенность, зависящая от личных качеств эксперта, его квалификации при выборе перечня сценариев. В целом, по общему мнению, изложенному в литературе по КОР, наибольший вклад в "бюджет неопределенности" аварийного (пожарного) риска вносят параметры, оценивающие вероятность событий.

Источником модельной неопределенности концептуального подтипа являются два принципиально различающихся подхода к оценке условной вероятности тех или иных сценариев аварии, рекомендуемые разными Руководствами по КОР: один из них опирается на статистику уже происшедших аварий, другой предполагает более диф-

ференцированную оценку – с учетом особенностей окружающей местности, расположения на ней источников зажигания. Следовало бы унифицировать подходы.

Источником параметрической неопределенности второго этапа является скрытая неопределенность точечных (дискретных) значений условных вероятностей сценариев аварий, рекомендуемых Руководствами по КОР. Она очевидна, если учесть, что возможность воспламенения облака топливовоздушной смеси (ТВС) даже на конкретном ВПОО с известным окружением сильнейшим образом зависит от большого числа обстоятельств – периода года, времени суток, метеоусловий на момент пожара (взрыва), и т.д. Значительно адекватнее задавать эти параметры в интервальной форме.

Третий этап процедуры КОР заключается в оценке поражающих факторов выбранных сценариев аварии. С учетом большого разнообразия физико-математических моделей, используемых отечественными и зарубежными Руководствами по КОР для прогнозирования поражающих факторов взрывов и пожаров на объектах нефтегазовой отрасли, модельная неопределенность данного этапа очень велика. Это может быть показано на примере удельной массовой скорости w , $\text{кг/м}\cdot\text{с}^2$, испарения пролива ЛВЖ, рассчитанной по трем моделям: Кавамуры-МакКея (CPR-14E), Саттона (Руководство Всемирного банка) и нормативной модели МЧС России (в точечной постановке, Рисунок 2).

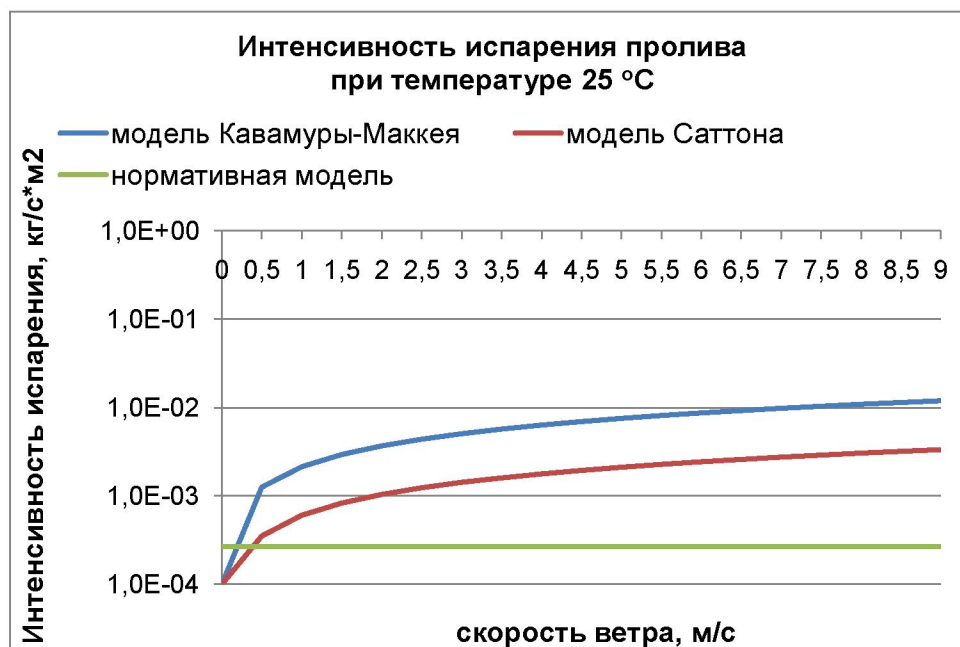


Рисунок 2 – Различия результатов расчёта интенсивности испарения бензина по трём моделям

В данном случае различие достигает двух порядков величины. А поскольку масса паров в облаке ТВС прямо пропорциональна величине w , модельная неопреде-

ленность при прогнозе поражающих факторов таких взрывопожарных сценариев как "взрыв ТВС", "пожар-вспышка", очень значительна.

Следует учитывать, что теоретическими методами может быть выполнена только верификация той или иной расчетной методики (модели). Что же касается ее валидации, здесь решающее значение принадлежит эксперименту, сравнению прогнозируемых и экспериментальных результатов, поскольку в рамках действующей естественнонаучной парадигмы только опыт является подлинным критерием истинности, все остальное – схоластика.

В третьей главе диссертации поражающие факторы различных сценариев аварии названы их целевыми метриками. Таким образом, предметом исследования третьего этапа КОР являлась неопределенность, сопровождающая оценку целевых метрик взрывопожарных сценариев аварии на ВПОО нефтегазовой отрасли. В общей сложности проанализировано девять таких сценариев.

Выполненный анализ показал, что третий этап процедуры КОР изобилует источниками неопределенности всех типов. Основные источники неопределенности, идентифицированные на данном этапе:

- *терминологического типа*, нечеткая трактовка таких понятий, как:

- "длина пламени" (пожара пролива, факельного горения). Это связано с тем, что в качестве границы пламени принимают границу области, либо светящейся в видимом диапазоне, либо эффективно излучающей в инфракрасном диапазоне, что порождает различие ее размеров до трех раз;

- "среднеповерхностная плотность теплового излучения" в отсутствии указания, учитывать или нет излучение оптического диапазона;

- "скорость ветра". Как правило, Руководства по КОР не дают четкого определения, что под скоростью ветра понимается средняя скорость ветра на высоте флюгера (10 м) с обязательным указанием периода осреднения (10 минут). Между тем, в разных странах используются иные периоды осреднения, и это ведет к различиям в величине средней скорости;

- "скорость воздушного потока над поверхностью пролива". Непосредственно над поверхностью (в слое шероховатости) скорость потока по определению равна нулю, поэтому нужно четкое указание, на какой высоте над поверхностью задается скорость;

- "диаметр" и "время жизни" огненного шара. Оба параметра объективно являются широкими интервалами, поэтому необходим ясный критерий задания их точечными величинами;

- взрывных волн при объемных взрывах облаков топливовоздушных смесей (ТВС). Некоторые Руководства по КОР называют поражающий фактор при подобных

взрывах в открытой атмосфере *ударной* волной. Однако данным термином правильнее обозначать особые воздушные взрывные волны, возникающие при взрывах детонационного типа. Это волны с крутым фронтом и относительно малой длительностью. У взрывных волн, образующихся при сгорании облака ТВС в дефлаграционном режиме, избыточное давление нарастает медленно, их продолжительность больше, поэтому вернее их называть *воздушными взрывными волнами*, или *волнами давления*:

- *модельного типа*:

- *сценарного подтипа*:

- в Руководствах по КОР отсутствуют указания на невозможность реализации сценария BLEVE на резервуарах типа РВС. Дело в том, что прочность резервуаров с вертикальными стенками на разрушение внутренним давлением (2 – 3 кПа) многократно меньше, чем резервуаров типа РГС (50 – 70 кПа), или сферических, поэтому в них соответствующие для BLEVE условия не могут сложиться, и имеющаяся статистика аварий это подтверждает. В силу этого неквалифицированными разработчиками этот сценарий аварии может учитываться на резервуарах типа РВС;

- выбор режима сгорания облака ТВС в открытой атмосфере по экспертной таблице ПЗ.3 нормативной методики МЧС России: а) либо без развития избыточного давления (*пожар-вспышка*); б) либо с избыточным давлением в одном из шести классов взрывного превращения. Однако прогнозируемый режим является лишь *наиболее* вероятным, при этом вероятность других режимов не равна нулю;

- *концептуального подтипа*, в Руководствах по КОР:

- пламя пожара (факела) моделируется: а) точечным излучательным центром, или их линейной совокупностью; б) твердым телом с излучением теплового потока исключительно поверхностью; в) объемным излучателем;

- испарение жидкости из аварийного пролива на открытой местности моделируется на основе механизма молекулярной или турбулентной диффузии. При этом количественные различия в величине удельной массовой скорости испарения могут достигать двух порядков величины;

- в сценарии "Объемный взрыв ТВС" при оценке энергетического потенциала взрыва учитывается, либо не учитывается, та часть облака, концентрация горючего вещества в которой превышает ВКПР (различие достигает одного порядка величины);

- распространение облака ТВС в турбулентной атмосфере моделируется на основании:

- к-ε теории турбулентной диффузии;
- моделей гауссова типа;
- боксовых моделей,

что приводит к очень серьезным количественным различиям к оценке поля концентраций примеси в атмосферном воздухе;

○ *аппроксимационного подтипа*, Руководства по КОР:

– учитывают или не учитывают влажность воздуха и концентрацию углекислого газа при расчете ослабления теплового потока в атмосфере;

– учитывают или не учитывают эффекты: а) удлинения основания пламени пожара пролива под действием ветра; б) влияния скорости ветра на длину факела и отклонение его оси; в) всплывания факела под действием сил плавучести;

– аппроксимируют форму пламени (пожара пролива, факела): а) цилиндром, б) конусом, в) усеченным конусом;

– задают долю тепла, расходуемого на излучение факела, константой или параметром, зависящим от массовой скорости истечения.

Таким образом, при существующем положении дел результаты КОР, выполненные с использованием различных действующих Руководств, неминуемо будут различаться. Альтернативность используемых моделей порождает неопределенность сдвига, тогда как наличие параметрической неопределенности создает неопределенность рассеивания. Неопределенность сдвига может быть минимизирована унификацией рекомендуемых моделей, устранением терминологической неопределенности.

Четвертый этап процедуры КОР предполагает максимально полную оценку прогнозируемого ущерба от аварии в натуральном выражении. Действующие Руководства по КОР рассматривают следующие виды подобного ущерба:

1) гуманитарный ущерб (поражение людей) при воздействии:

а) пламени (пожара пролива, факельного горения) и горячих продуктов сгорания ТВС (при пожаре-вспышке) – летальный исход;

б) теплового излучения пожара пролива, факельного горения струи горючих газов или паров, огненного шара – гибель, ожоги различной степени;

в) воздушной взрывной волны при взрывах ТВС в открытом пространстве и внутри зданий – гибель, барические и механические травмы;

г) летящих осколков и обломков, разбрасываемых при взрыве – летальный исход, травмирование. Поскольку масса такого предмета обычно велика (не менее 1 кг), попадание летящего осколка в человека, как правило, заканчивается гибелью последнего;

2) материальный ущерб (повреждение различной степени зданий и сооружений, материалов, транспортных средств):

а) в результате возгорания стационарных и подвижных объектов при контакте с пламенем или вследствие нагревания тепловым излучением (пожара пролива, факельного горения струи горючих газов или паров, огненного шара);

б) при воздействии на них воздушной взрывной волны;

в) при ударе осколков и обломков, разлетающихся при взрыве. Можно считать, что попадание тяжелого летящего обломка в подавляющем большинстве случаев заканчивается разрушением здания или сооружения;

3) экологический ущерб, вызываемый: а) загрязнением природных сред (атмосферы, водных объектов, почв) опасными веществами, выбрасываемыми в результате аварии и/или продуктами их сгорания; б) их деградацией природных сред вследствие взрыва (пожара).

К особому типу эффектов воздействия поражающих факторов аварии следует отнести эскалацию взрыва (пожара) по каскадному механизму (эффект "домино"), когда его поражающие факторы на одном ВПОО (или его составляющей), порождают взрывы (пожары) на соседних опасных объектах нефтегазовой отрасли. В результате подобной эскалации величина ущерба многократно возрастает.

Руководства по КОР допускают использование как детерминированного, так и вероятностного способа оценки степени поражения людей и различного оборудования в результате взрыва (пожара). Детерминированный способ, основанный на пороговой концепции, является менее информативным. Вероятностный подход к прогнозированию поражения человека, зданий и сооружений при взрыве (пожаре) использует так называемые пробит-функции P_r , впервые предложенные Финни (Finney). Он пригоден для описания отклика объекта на воздействие любого фактора случайной природы, если этот эффект подчиняется нормальному распределению вероятности. Величина P_r имеет нормальное распределение со средним значением 5 и стандартным отклонением 1. Эта зависимость также может быть выражена с помощью стандартной функций ошибок.

В итоге в результате анализа неопределенности четвертого этапа процедуры КОР были выявлены следующие ее источники:

- *терминологического типа* – как показал анализ, исчерпывающий терминологический аппарат данного этапа КОР к настоящему времени не разработан, для описания некоторых видов ущерба от аварии, его характеристик, используются различные термины и понятия. В ряде случаев четкое и однозначное толкование терминов не приведено (например, не указана продолжительность экспозиции для пороговой интенсивности теплового потока, вызывающего гибель объектов природной среды). Этот источник неопределенности может быть устранен с помощью соответствующего глоссария;

- *модельного типа*:

- *концептуального подтипа*:

– без какого-либо обоснования вероятностный подход к прогнозированию ущерба постулирует применимость нормального закона распределения степени поражения любых объектов любыми поражающими факторами;

– расчетные соотношения, полученные по результатам воздействия: а) теплового излучения на людей при ядерном взрыве, необоснованно используются для моделирования эффектов воздействия на них теплового излучения пожаров проливов и горящих факелов. Это некорректно, поскольку спектр теплового излучения в обоих случаях сильно различается, длинноволновое излучение горящего пролива проникает в кожу глубже; б) на здания ударных волн при взрыве обычных боеприпасов – без достаточных оснований применяются для прогнозирования воздействия на них взрывных волн дефлаграционных взрывов;

– расчетные соотношения для прогнозирования последствий воздействия на людей и здания взрывных волн при внутренних взрывах отсутствуют, а использование для этих целей без должного обоснования корреляций, полученных при воздействии на них взрывных волн снаружи, некорректно;

– в отечественных Руководствах по КОР отсутствуют аналитические выражения, позволяющие учесть наличие на человеке одежды при воздействии на него теплового потока;

– в рамках вероятностного подхода отсутствуют пробит-функции для прогнозирования эффектов поражения разной степени. Это касается экологического ущерба и осколочного поражения людей, здания и оборудования;

○ *аппроксимационного подтипа:*

– обращает на себя внимание различие: а) коэффициентов в формулах пробит-функций, рекомендуемых различными Руководствами по КОР; б) формул для расчета параметра безразмерного избыточного давления взрыва \bar{p} в одинаковых выражениях для пробит-функции при прогнозировании состояния нокдауна человека при барическом воздействии:

▪ по формуле (П4.5) нормативной методики МЧС РФ: $\bar{p} = \frac{\Delta P}{P_0}$;

▪ соотношению (5-15) Руководства по безопасности "Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах": $\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0}$;

• *параметрического типа:* параметры рекомендуемых расчетных соотношений для пробит-функций заданы точечными числами, содержащими значительную скрытую неопределенность.

Четвертый этап КОР является одним из важнейших, поскольку именно на данном этапе по известным величинам поражающих факторов оценивается вероятность

причинения ущерба людям, имуществу, окружающей среде. Устранение указанных источников неопределенности позволит сузить интервалы оцениваемых показателей риска, сделав их точнее.

В настоящее время управление пожарной и промышленной безопасностью в России осуществляется в рамках риск-ориентированного подхода, предполагающего управление аварийным (пожарным) риском. В свою очередь оценка риска означает количественную оценку величины ущерба вследствие аварии и вероятности его причинения. С учетом различной природы составляющих полного аварийного ущерба (гуманитарного, экологического, материального), выраженных в натуральной форме, они имеют различную размерность, поэтому их непосредственное суммирование невозможно. Единственным способом выразить совокупный ущерб в виде числа является задание всех его слагаемых в единицах одинаковой размерности, т.е. в денежном эквиваленте.

Пятый этап процедуры КОР заключается в получении экономической оценки составляющих полного ущерба при аварии. Во второй главе диссертации проанализирована неопределенность действующей в настоящее время нормативно-методической базы, используемой для этой цели. В итоге идентифицированы следующие источники неопределенности пятого этапа:

- *терминологического типа:*

- общепринятый термин для обозначения вреда, причиняемого при аварии персоналу/населению отсутствует, используются альтернативные варианты: медико-биологический, медико-социальный, гуманитарный;

- в некоторых нормативно-методических документах (НМД) нечетко трактуются такие базовые понятия методологии, как риск;

- *модельного типа, концептуального подтипа:*

- НМД не всегда дифференцируют различные цели получения денежной оценки средней стоимости человеческой жизни (ССЖ): а) при оценке ущерба, который причиняется обществу при гибели человека; б) при оценке денежной компенсации семье погибшего. Известно, что величина ССЖ, соответствующего двум этим целям, существенно различается;

- отсутствует единый перечень составляющих полного аварийного ущерба, подлежащего денежной оценке. Так, некоторые действующие НМД допускают включение в перечень морального вреда пострадавшим в аварии. Кроме того, с учетом большой неопределенности, неясна необходимость включения в этот перечень косвенного материального ущерба;

- некоторые действующие НМД допускают неэкономические способы получения денежной оценки отдельных составляющих ущерба;

– используются различные подходы к оценке величины средней стоимости жизни (ССЖ);

- *параметрического типа* – задание параметров рекомендуемых расчетных соотношений точечными числами (наличие параметрической неопределенности проигнорировано).

Как следует из приведенного анализа, идентифицированные источники неопределенности пятого этапа процедуры КОР носят эпистемический характер и могут быть устранены принятием соответствующих соглашений, или изданием глоссария.

В завершении второй главы диссертации приведен пример количественной оценки терминологической неопределенности. На примере сценария аварии "пожар пролива" показано, что различное толкование параметра "длина пламени" приводит к четырехкратному различию величины интенсивности падающего на объект-мишень теплового потока.

Третья глава диссертации посвящена рассмотрению интервального способа оценки параметров аварийного риска. Интервальный подход подразумевает: 1) обоснованное задание значений входных параметров задачи интервалами (ввиду отсутствия у величины параметров статистической устойчивости, неопределенность последних задана в интервальной форме); 2) выполнение всех необходимых расчетов методами интервального анализа. Таким образом, интервальная постановка позволяет получить прямую количественную оценку неопределенности расчета, которая оценивается шириной интервального числа, являющегося результатом вычислений.

Задание неопределенности величины параметра интервальным числом эквивалентно указанию границ интервала его возможных значений и ограничивается требованием "выпуклости", которое означает, что она может принимать любые значения в пределах заданных границ.

В целях апробации выполнения КОР в интервальной постановке в главе выполнена интервальная оценка целевых метрик сценариев аварии на пяти ВПОО нефтегазовой отрасли: резервуарном парке светлых нефтепродуктов; насосной светлых нефтепродуктов; сливо-наливной эстакаде светлых нефтепродуктов; автомобильной газозаправочной станции (АГЗС), технологическом блоке газораспределительной станции (ГРС).

Предварительно для каждого из пяти ВПОО было выполнено логико-вероятностное моделирование аварии с использованием графов, называемых диаграммами "галстук-бабочка" (ДГБ).левой частью ДГБ является дерево отказов (ДО), правой – дерево событий (ДС), в центре графа – головное событие (ГС) аварии. Для рассматриваемых аварий ГС заключается в выбросе опасного вещества. ДГБ, по сути, является таблицей, в ячейках которой в виде прямоугольников отображены события с

изображением логических связей между ними. Столбцы таблицы (обозначены арабскими цифрами) названы ярусами, строки (обозначены буквами латиницы) – уровнями. Кроме событий-прямоугольников, ДО содержит логические знаки "И" и "ИЛИ", разделяющие ярусы дендрограммы. Пример ДГБ аварии в технологическом блоке ГРС приведен на Рисунке 3.

Важное замечание – головное (узловое) событие всех трех графов – аварийное поступление опасного вещества в окружающую среду – на ДГБ показано как единичное событие. На самом деле оно представлено серией вариантов, различающихся продолжительностью, объемом выброса и/или вероятностью, поэтому наиболее подходящим математическим формализмом для его полного описания является матрица. Учитывая это, классическая ДГБ аварийного процесса в диссертации усовершенствована – ее головное событие и события правой части заданы интервальными матрицами (в интервальном анализе называемыми брусами), строки которых являются интервальными векторами, отвечающими различным вариантам ГС.

Кроме того, разным вариантам ГС соответствуют различные перечни возможных сценариев дальнейшего развития аварии. В частности, эскалация аварии по "механизму домино" возможна только для вариантов головного события, сопровождающихся большими объемами утечек. Следует отметить, что Руководствами по КОР данное важное обстоятельство игнорируется.

Ввиду наличия у входных параметров моделей стохастической и/или эпистемической неопределенности их величина задавалась интервалами (интервальными числами). Все необходимые в рамках КОР вычисления для расчета параметров аварии, риска аварий с использованием отечественных Руководств по КОР осуществлялись в интервальной постановке.

По определению проф. С.П.Шарого интервальным анализом называется отрасль математического знания, исследующая задачи с интервальными неопределенностями и методы их решения. Интервальный анализ регламентирует выполнение любых математических операций над интервальными числами. В третьей главе диссертации интервальные вычисления выполнялись на ПЭВМ с использованием версии 10.2 пакета INTLAB, разработанного проф. З.М. Румпом (S.M. Rump).

Как известно, интервальные расчеты в классической (наивной) версии интервального анализа сопровождаются значительной неопределенностью, заключающейся в неоправданном увеличении ширины интервалов результатов расчетов. Этот эффект обязан либо неоднократному вхождению любого интервального параметра в расчетное соотношение, либо наличию функциональной связи между входными параметрами расчетной модели. Для его преодоления в интервальном анализе разработан ряд методов: Рамона Мура, глобальной оптимизации, а также аффинное представление интер-

вальных чисел. Учитывая термодинамическую связность параметров моделей, описывающих взрывы и пожары на ВПОО нефтегазовой отрасли, интервальные расчеты в ряде случаев выполнялись с использованием комбинации трех названных методов.

В INTLAB имеются процедуры `affari`, `verifyglobalmin` и др., облегчающие применение вышеуказанных методов подавления вычислительной неопределенности интервальных расчетов.

Так, чтобы минимизировать неопределенность, обусловленную зависимостью термодинамических параметров флюида от температуры, по методу Рамона Мура интервал температуры атмосферного воздуха T_a был предварительно разбит на 26 подинтервалов шириной 1 К. В результате параметр T_a был задан 26-ти компонентным интервальным вектором (брусом). Расчеты всех зависимых от температуры параметров выполнялись для каждого из этих 26-ти подинтервалов, в результате каждый из них оказывался 26-ти компонентным брусом. В качестве результата принималась их интервальная оболочка.

В качестве примера интервального расчета на Рисунке 4 показана зависимость от расстояния габаритов "факела" тяжелого газа по боксовой модели Бриттера-МакКвайда для начального радиуса b_0 облака (принимаемого равным радиусу пролива) $b_0 = 8,3$ м и скорости ветра, заданной интервалом $u_w \in [1.5, 9]$ м/с.



Рисунок 3 – Диаграмма "галстук-бабочка" аварии в технологическом блоке ГРС

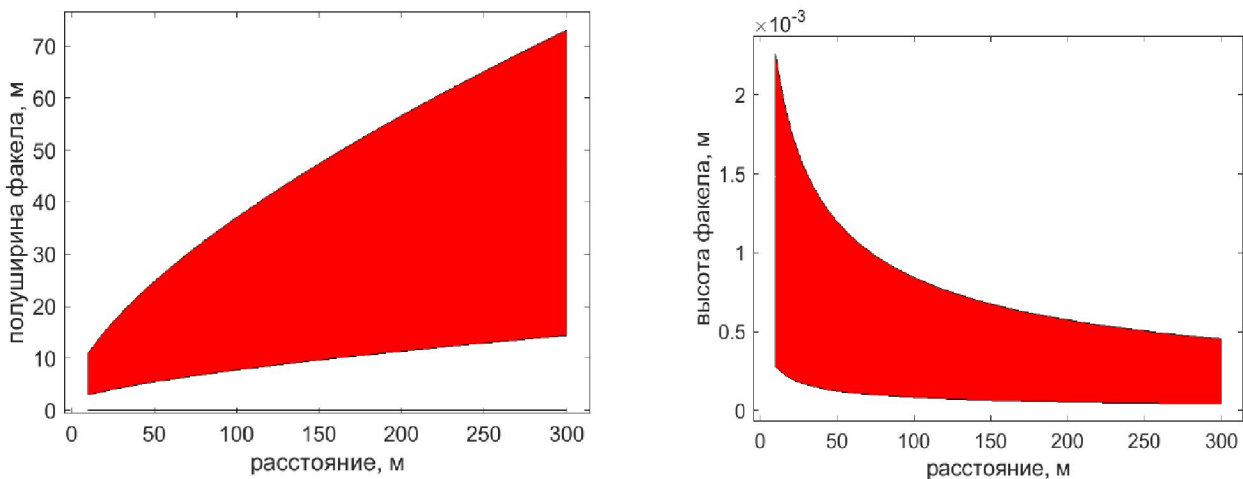


Рисунок 4 – Зависимость полуширины факела (слева) и его высоты (справа) от расстояния до источника (центра пролива) для варианта ГС 2, *h* аварии на территории резервуарного парка светлых нефтепродуктов

Рисунок 4 показывает, что, в отличие от традиционной точечной (дискретной) постановки при интервальных вычислениях результат расчета (полуширина факела или его высота) представлен отрезком, длина которого непосредственно характеризует его неопределенность.

Еще одним примером интервального расчета является расчет массового расхода $G_{\text{выб}}$ бензина при гильотинном обрыве трубопровода в насосной светлых нефтепродуктов со стороны всаса. В этом случае будет наблюдаться безнапорное истечение бензина из резервуара через отрезок трубопровода. В квазистационарном приближении (с учетом малой продолжительности утечки) уровень бензина в резервуаре практически не меняется. Массовый расход $G_{\text{выб}}$, кг/с, может быть рассчитан по модели, рекомендованной Руководством по безопасности "Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных жидкостей", утв. Приказом Ростехнадзора от 17 сентября 2015 г. № 366.

Интервальный расчет дал величину массового расхода $G_{\text{выб}} \in [0.053, 0.38]$ кг/с. Это интервальное число со средним 0,22 кг/с и радиусом (полушириной) 0,16 кг/с.

Результатом расчетов первого этапа КОР явились интервальные матрицы (брусы) параметров головного события аварии (вероятности и масштаба) на всех рассматриваемых ВПОО. Пример такого бруса для АГЗС приведен в Таблице 1.

Как следует из Таблицы 1, в случае длительной утечки опасного вещества из аварийного отверстия масштаб ГС характеризуется величиной массового расхода, при квазигнновенном разрушении сосуда – массой облака ТВС.

На втором этапе процедуры КОР для каждого варианта ГС выполнялась корректировка ДГБ аварии с учетом перечня возможных сценариев дальнейшего развития

аварии, оценивались их условные вероятности. Они отражены в соответствующих строках брусков целевых метрик третьего этапа КОР.

Таблица 1 – *Параметры вариантов головного события аварии на территории автомобильной газозаправочной станции*

Вариант ГС /параметр	-2,a	-2,b	-2,c	-2,l	-2,m	-2,o
Вероятность Р, год ⁻¹	$5 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	[1.3, 5.4] · 10 ⁻⁶	[1.4, 5.5] · 10 ⁻⁷	$2 \cdot 10^{-7}$
Массовый расход СУГ, кг/с	[0.45, 4.1]	[2.1, 16.9]	–	[0.066, 0.29]	[6.6, 29.2]	–
Масса облака ТВС, кг	–	–	[143, 6595]	–	–	[0, 24]

Третий этап КОР заключается в оценке целевых метрик (поражающих факторов) прогнозируемых сценариев аварии на рассматриваемом ВПОО. Расчеты выполнялись для условного объекта-мишени, расположенного на удалении 100 м от центра ГС.

В итоге этой работы для каждого сценария аварии были рассчитаны целевая(ые) метрика(и), примеры которых приведены в Таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "Объемный взрыв в помещении" для вариантов головного события аварии в технологическом блоке газораспределительной станции*

Вариант ГС /параметр	-2,d	-2,c	-2,b	-2,a
Избыточное давление, кПа	[80.7, 87.3]	[0, 87.3]	[318, 489]	[8.9, 34.3]
Условная вероятность	[0.12, 0.6]	[0.048, 0.24]	[0.048, 0.24]	[0.016, 0.08]

Из Таблиц 2 и 3 следует, что величина неопределенности целевой метрики, характеризующей шириной интервала, значительно различается для вариантов ГС. Она зависит от неопределенности входных параметров модели.

Таблица 3 – *Целевые метрики и условная вероятность сценария "Факельное горение струи" для вариантов головного события аварии на территории АГЗС*

Вариант ГС /параметр	-2,a	-2,b	-2,l	-2,m
Интенсивность теплового потока, кВт/м ²	[14.1, 14.6]	[14.4, 15.6]	[14.9, 16.2]	[14.0, 14.1]
Длина факела L _Ф , м	[10.5, 26.4]	[22.1, 46.3]	[5.0, 9.1]	[31.9, 57.8]
Условная вероятность	[0.0114, 0.057]	[0.0114, 0.057]	[0.0114, 0.057]	[0.0114, 0.057]

Оценка целевых метрик сценария "BLEVE" аварии имела особенность, обусловленную следующим обстоятельством: как показал анализ, если в обогреваемом пожаром резервуаре находится ЛВЖ, модель нормативной методики МЧС РФ непригодна для оценки энергетического потенциала взрыва. В связи с этим в третьей главе диссер-

тации для сценария BLEVE на основании термодинамических соображений количественно оценены:

а) работа первичного пара, кинетическая энергия осколков:

$$c_v \cdot m_{\text{п1}} \cdot (T_1 - T_2) = \int_{V_{\text{п1}}}^{V_{\text{п2}}} P \cdot dV_{\text{п1}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{оск}}} \frac{m_{\text{оск},i} \cdot u_{\text{оск},i}^2}{2}, \quad (1)$$

Примечание: в очень грубом приближении массы всех осколков приняты равными;

б) работа вторичного пара,

$$A_{\text{вп}} = P_{\text{н}} \cdot m_{\text{вп}} \cdot (v_{\text{вп}} - v_{\text{ж}}), \quad (2)$$

в) теплота фазового перехода

$$Q_{\text{исп}} = \Delta H_b \cdot (m_{\text{ж1}} - m_{\text{ж2}}), \quad (3)$$

г) поверхностная энергия капельной фазы:

$$E_{\text{пов}} = \varphi(T_b) \cdot S_k = \pi \cdot \varphi(T_b) \cdot d_k^2 \cdot N_k = \frac{3 \cdot \varphi(T_b) \cdot m_{\text{ж2}}}{16 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot d_k}, \quad (4)$$

Корректная постановка задачи требует учесть эффект увеличения давления насыщенного пара $\Delta P_{\text{н}}$ вблизи искривленной поверхности капли, которое для сферы диаметром d_k по формуле Вильяма Томсона равно:

$$\Delta P_{\text{н}} \approx \frac{4 \cdot v_{\text{ж}} \cdot \varphi(T_3)}{v_{\text{п}} \cdot d_k} = \frac{4 \cdot \rho_{\text{вп}} \cdot \varphi(T_3)}{\rho_{\text{ж}} \cdot d_k}. \quad (5)$$

Согласно выполненному расчету для капель диаметром 100 мкм данный эффект оказался незначителен.

Для оценки модуля начальной скорости разлета осколков оболочки сосуда при сценарии "BLEVE" использован метод из СТО Газпром 2-2.3-400-2009, рекомендованный к применению Руководствами по безопасности Ростехнадзора.

Все расчеты выполнены в интервальной постановке. Согласно полученным оценкам основным "стоком" энергии BLEVE является теплота, расходуемая на испарение жидкой фазы флюида. И хотя энергетический потенциал жидкой фазы $\Delta U_{\text{ж}}$ больше, чем потенциал первичного пара $\Delta U_{\text{п1}}$, энергия $\Delta U_{\text{ж}}$ не будет участвовать в создании поражающих факторов (воздушной взрывной волны и разбрасывании осколков). Энергетический потенциал взрыва приравнен убыли внутренней энергии первичного пара $\Delta U_{\text{п1}}$.

Брус оцененных целевых метрик сценария BLEVE приведен в Таблице 4:

Таблица 4 – *Целевая метрика и условная вероятность сценария "BLEVE" для единственного варианта ГС аварии на территории резервуарного парка*

Вариант ГС /параметр	-2,e
Энергетический потенциал E_{eff} , Дж	$[0.33, 6.8] \cdot 10^7$
Средняя скорость разлета осколков, м/с	[8.4, 25.3]
Условная вероятность	[0.028, 0.14]

Следует указать, что интервальные оценки, приведенные в Таблице 4, получены при ряде упрощающих допущений.

В целом необходимо подчеркнуть, что полученные в третьей главе диссертации оценки неопределенности целевых метрик сценариев аварии неполны в силу следующих обстоятельств:

1) из четырех известных видов неопределенности, присущих аварийному риску (терминологическая, модельная, параметрическая и вычислительная) в ней рассмотрены и количественно оценены только два последних;

2) не оценена сценарная неопределенность, обусловленная ограничением Руководствами по КОР как перечня вариантов ГС (левая часть), так и перечня сценариев аварии (правая часть ДГБ);

3) неизвестная по масштабу скрытая неопределенность заключается в точечных значениях ряда параметров, рекомендуемых Руководствами по КОР;

4) в большей части случаев область применимости используемых физико-математических моделей взрывов (пожаров) Руководствами по КОР не сообщается, поэтому не исключено использование данных моделей вне рамок их валидности.

Неопределенность полученных оценок целевых метрик сценариев аварии в резервуарном парке, насосной, сливо-наливной эстакаде светлых нефтепродуктов во многом обусловлена неопределенностью физико-химических свойств обращающегося в них опасного вещества – автомобильного бензина Аи-92. Как известно, его молярная масса является широким интервалом $\mu \in [88.1, 149.7]$ кг/кмоль, что повлекло за собой значительную ширину интервалов зависимых параметров – таких, например, как плотность его паров. Кроме того, с целью придания задаче наибольшей реалистичности при выполнении количественных оценок ее внешним параметрам были намеренно приписаны максимально возможные диапазоны изменений. Так, например, принято, что масса бензина в резервуаре в момент взрыва представлена широким интервалом $m \in [200, 40000]$ кг. Естественно, это оказало непосредственное влияние на величину неопределенности целевых метрик сценариев аварии.

В третьей главе диссертации показано, что, наряду с собственно КОИ, интервальная постановка выполнения КОР позволяет решить ряд других важных для практики задач.

А. Оценка значимости параметров (параметрической чувствительности) используемых физико-математических моделей. Традиционно она выполняется методами статистического моделирования, достаточно затратными по времени. В рамках интервального подхода задача решается очень быстро и просто – достаточно задать все прочие независимые входные параметры модели, кроме исследуемого, очень узкими интервалами. Ширина интервала полученной целевой метрики (отклик модели) будет непосредственно

характеризовать параметрическую чувствительность модели к данному параметру. Оценка значимости параметров модели имеет особое практическое значение для управления риском ВПОО нефтегазовой отрасли на проектном этапе, т.к. позволяет проектировщику определить, какие именно параметры технической системы следует изменить, чтобы добиться наиболее эффективного уменьшения целевых показателей аварийного риска.

Это показано на примере сценария "Объемный взрыв паров" для варианта $(-3, f)$ ГС аварии на территории сливо-наливной эстакады светлых нефтепродуктов, целевая метрика которого рассчитана с использованием нормативной методики МЧС России. Для того, чтобы оставаться в рамках интервального подхода, все независимые входные параметры модели сначала были заданы интервалами, середина которых оставлена прежней, а ширина уменьшена стократно. При этом относительная ширина данных интервалов радиус/середина ($\text{rad}(I)/\text{mid}(I)$) составила примерно 1%. При указанных значениях входных параметров получено значение прогнозируемого избыточного давления взрыва на удалении 100 м $\Delta P \in [864, 894]$ Па с относительной шириной 1.7%.

Далее, при задании входных параметров (по одному) полным интервалом, получены отклики целевой метрики сценария на их варьирование. В итоге удалось ранжировать входные параметры модели по величине их значимости, в Таблице 5 они приведены в порядке убывания значимости.

Таблица 5 – *Оценка параметрической чувствительности модели*

Варьируемый параметр	Отклик целевой метрики ΔP , Па	Относительная ширина отклика, %
Все входные параметры стократно "заужены"	[864, 894]	1.7
Длительность испарения, $t_{\text{исп}} \in [6, 3600]$ с	[121, 1190]	81.4
Скорость ветра $u_w \in [0, 0.25]$ м/с	[536, 1132]	35.7
Скорость фронта пламени $u_{\text{фр}} \in [150, 200]$ м/с	[594, 1235]	35.1
Молярная масса $\mu \in [88.1, 149.7]$ кг/кмоль	[730, 1023]	16.7
Температура воздуха $T_v \in [273, 299]$ К	[806, 948]	8.1

Анализ Таблицы 5 свидетельствует, что модель нормативной методики МЧС России предсказуемо наиболее чувствительна к продолжительности испарения пролива, прямо влияющей на массу паров в облаке ТВС, на втором месте по чувствительности – скорость ветра.

Б. *Оценка консервативности принятых допущений.* В первоначальный период развития методологии КОР часто рекомендовался т.н. консервативный подход, в рамках которого для расчета показателей риска всем входным параметрам задачи присваивались их экстремальные точечные (дискретные) значения (наибольшие или наименьшие, в зависимости от их влияния на величину целевой метрики сценария).

При выполнении КОР в интервальной постановке наибольшие значения целевых метрик сценариев аварии могут найдены методом глобальной оптимизации. Представляет интерес сравнить результаты применения консервативного подхода в традиционной точечной и интервальной постановках. В третьей главе диссертации такой сравнительный анализ выполнен на примере сценария "Объемный взрыв облака ТВС", целевая метрика которого рассчитывалась с использованием расчетных соотношений нормативной методики МЧС России:

а) вначале была выполнена точечная консервативная оценка избыточного давления взрыва при наибольших значениях всех входных параметров, кроме НКПР бензина, которому приписано минимальное значение 0.96 %. При этом получена точечная консервативная оценка прогнозируемого избыточного давления взрыва на удалении 100 м $\Delta P_T = 2.44$ кПа;

б) затем была выполнена его консервативная оценка в интервальной постановке, при которой все параметры модели были заданы интервальными числами. Методом глобальной оптимизации был найден экстремум (максимум) целевой функции (избыточного давления взрыва), равный верхней границе области ее значений, равной $\Delta P_{и} \in [0.017, 2.7]$ кПа.

Заметно, что в данном случае интервальная консервативная оценка избыточного давления взрыва $\Delta P_{и}$ превышает ее точечную "консервативную" ΔP_T на 10%.

Аналогичное сравнение точечных "консервативных" оценок целевых метрик сценариев аварии с полученными ранее их интервальными оценками было выполнено для четырех других сценариев, полученные результаты отражены в Таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение результатов консервативного расчета целевых метрик ряда сценариев аварии

Сценарий аварии, целевая метрика	Консервативная оценка	
	интервальная	точечная
<i>Пожар пролива</i> , интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м ²	[7.7, 14.4]	14.4
<i>Огненный шар</i> , интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м ²	[9.6, 65.3]	65.3
<i>Факельное горение струи</i> , интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м ²	[16.2, 18.2]	18.2
<i>Объемный взрыв ТВС</i> , избыточное давление взрыва ΔP , кПа	[0.017, 2.7]	2.44
<i>Пожар-вспышка</i> , радиус зоны воздействия R _Г , м	[1.3, 158]	122

Таблица 6 ясно демонстрирует, что в двух последних из пяти рассмотренных сценариев аварии точечные "консервативные" значения целевых метрик оказались существенно (на 10 – 30%) меньше верхних границ их интервальных оценок. Таким образом,

"консервативные" точечные оценки поражающих факторов аварии оказалась не вполне консервативными.

Это происходит оттого, что в общем случае немонотонные математические функции достигают своих экстремальных значений необязательно на границах области определения. В то же время метод глобальной оптимизации в интервальной постановке позволяет гарантированно найти границы (min и max) области значений целевой функции любого типа. Консервативная постановка задачи часто используется на практике для приблизительных оценок аварийного риска ВПОО нефтегазовой отрасли, поэтому именно интервальная постановка задачи дает истинную оценку "консервативных" значений показателей риска.

В отличие от традиционного точечного метода, в котором сужение области неопределенности (уменьшение шага расчетной сетки) требует значительного увеличения вычислительных ресурсов, интервальная постановка позволяет решить задачу с использованием гораздо меньшей вычислительной мощности и затрат времени.

Интервальная постановка задачи позволяет сравнивать между собой показатели аварийного риска: пусть параметр A представлен интервалом $R_A \in [\underline{a}, \bar{a}]$, а параметр B – интервалом $R_B \in [\underline{b}, \bar{b}]$, где \underline{a} и \underline{b} – нижние, а \bar{a} и \bar{b} – верхние границы соответствующих интервалов (в частном случае $\underline{b} = \bar{b}$). Принимается, что $A > B$, если $\underline{a} > \bar{b}$, и соответственно, $A < B$, если $\bar{a} < \underline{b}$. Это использовано в четвертой главе диссертации при обосновании подхода к нормированию интервально-значных показателей аварийного риска ВПОО нефтегазовой отрасли.

В. Разработан способ улучшения (уменьшения ширины) получаемых интервальных оценок целевых метрик сценариев аварии в ситуациях, когда имеется статистическая информация о поведении величины параметров в пределах их интервалов. Ниже на условном примере показано, как он работает. Принято допущение, что достоверно известна следующая информация: а) статистика величины объема хранения автомобильного бензина в некоем резервуаре РВС-2000 (Таблица 7); б) плотность вероятности распределения температуры атмосферного воздуха в месте его расположения.

Таблица 7 – *Статистическая информация об объемах хранения*

Объем хранения м ³	Доля времени, процентов
200 ÷ 400	6
400 ÷ 600	9
600 ÷ 1600	73
1600 ÷ 1900	8
1900 ÷ 2000	4

Допущение а) предполагает, что по эксплуатационным данным известно, какую долю времени количество бензина в резервуаре находится в пределах, указанных в

строках таблицы. Далее, принято, что в Республике Марий Эл среднесуточная температура воздуха подчиняется распределению Гаусса со средним $\bar{T}_в = 286$ К и СКО $\sigma_T = 6$ К. Была построена соответствующая дискретная плотность вероятности с шагом 1 К, после чего она была нормирована с тем, чтобы площадь гистограммы оказалась равной 1,0.

Вначале была выполнена оценка избыточного давления объемного взрыва ТВС паров бензина на удалении 100 м от центра пролива для головного события аварии, заключающейся в катастрофическом разрушении резервуара при $V_{xp} \in [200, 2000]$ м³ и диапазоне температур воздуха $T_a \in [273, 299]$ К, т.е. без учета статистической информации о температуре воздуха и объемах хранения. Расчеты выполнялись, как и выше, методами Р.Мура и, в ряде случаев – глобальной оптимизации, для элементов бруса размерности 26×1 . Результатом (интервальной оболочкой) такой оценки явилась величина $\Delta P_1 \in [52, 5112]$ Па.

Затем, с учетом независимости температуры воздуха и объема хранения, была построена двумерная матрица совместных вероятностей размером 26×5 , каждый элемент которой равен произведению соответствующих элементов векторов вероятностей температуры и объемов хранения. После этого, при задании определенных уровней значимости, была выполнена отсечка элементов этой матрицы. Сумма вероятностей элементов матрицы, больших чем:

0.0025, оказалась примерно равна 0.95;
 0.0035, 0.9;
 0.006, 0.8.

На следующем шаге была получена матрица 26×5 величин избыточного давления взрыва, соответствующих 26-ти подинтервалам температуры атмосферного воздуха и пяти вариантам объема хранения бензина. Для элементов матрицы, совместная вероятность которых меньше соответственно, 0.0025 0.0035 и 0.006, избыточное давление взрыва было приравнено к среднему значению $\text{mid}(\Delta P_1)$ их интервалов, после чего были получены интервальные оболочки соответствующих матриц избыточного давления с отсечкой.

Результаты расчетов: $\Delta P_{95} \in [55.5, 4750]$ Па; $\Delta P_{90} \in [56.0, 4700]$ Па; $\Delta P_{80} \in [70, 4670]$ Па показывают, что использование имеющейся статистической информации позволяет существенно улучшить результаты интервального расчета (сузить интервалы), т.е. уменьшить неопределенность получаемых интервальных оценок.

В четвертой главе диссертации разработан интервально-матричный метод КОР, позволяющий:

1) наиболее полно учесть все возможные (из перечня принятых к учету) варианты головного события аварии и сценарии ее развития;

2) получить монетарную оценку полного аварийного ущерба, включающего его гуманитарную, материальную и экологическую составляющие;

3) рассчитать целевой показатель (метрику) аварийного риска ВПОО, сочетающую оценки, как вероятности, так и величины полного ущерба всех вариантов возникновения и развития аварии;

4) выполнить количественную оценку неопределенности целевой метрики риска.

В рассматриваемом методе решение поставленных задач обеспечивается заданием:

1) исчерпывающего перечня рассматриваемых вариантов головного события аварии и сценариев ее развития;

2) величины параметров: а) взрывопожароопасного объекта; б) объектов-мишеней, попадающих в область поражающих факторов аварии; в) событий аварийного процесса – интервальными матрицами (брусами);

3) всех составляющих полного ущерба аварии в денежном эквиваленте.

Вначале в рамках описываемого метода на рассматриваемом ВПОО вводится местная декартова система координат. Предполагается, что объекты-мишени, попадающие в область поражения пожара (взрыва), относятся к одному из трех типов – люди, имущество, объекты природной среды. Свойства каждого объекта-мишени задаются соответствующим вектором-строкой, столбцы которого характеризуют все необходимые его свойства (пространственные координаты, вероятность нахождения в указанной точке, уязвимость к тому или иному поражающему фактору и т.д.). Наличие у объектов-мишеней параметрической неопределенности учитывается тем, что каждый вектор-строка является брусом. Например, в виде интервалов задаются координаты некоторой области, в которой может находиться подвижный объект-мишень.

Основная идея метода заключается в том, что в рамках риск-ориентированного подхода, имея в качестве стратегической цели управление промышленной (пожарной) безопасностью, в качестве количественной ее меры следует использовать целевой показатель, являющийся *числом*. Это необходимо, поскольку сравнивать альтернативные проектные решения (либо с нормативным значением, либо между собой) можно только числа. В предложенном методе в качестве такого числа используется комплексный целевой показатель – метрика аварийного риска RR , рублей/год:

$$RR = \mathbf{P} \times \mathbf{U} = \sum_{i=1}^K P_k \cdot U_k, \quad (6)$$

где \mathbf{P} – брус вероятностей P_k реализации вариантов головных событий аварии на данном ВПОО, год⁻¹; \mathbf{U} – брус взвешенных величин полного ущерба U_k (в денежном выражении), причиняемого во всех сценариях аварии на данном ВПОО при k -м варианте головного события, рублей; $k = 1, 2, \dots, K$ – номер варианта головного события.

В свою очередь, величины U_k рассчитываются по аналогичному соотношению

$$U_k = \sum_{i=1}^I P_{ik} \cdot U_{ik}, \quad (7)$$

где P_{ik} – брус условных вероятностей реализации i -го сценария аварии при k -ом варианте ее головного события; U_{ik} – брус величин полного аварийного ущерба (в денежном выражении), причиняемого объектам-мишеням, расположенным в области поражения, при i -м сценарии аварии и k -м варианте ее головного события, рублей; $i = 1, 2, \dots, I$ – номер сценария развития аварии.

Параметр U_{ik} является взвешенной суммой принятых к учету видов ущерба, причиняемых всем J объектам-мишеням, оказавшимся в области поражения при i -м сценарии реализации аварии и k -м варианте головного события с учетом условной вероятности причинения ущерба:

$$U_{ik} = \sum_{j=1}^J P_{ikj} \cdot U_{ikj}, \quad (8)$$

где P_{ikj} – брус условных вероятностей причинения j -му объекту-мишени заданного ущерба соответствующего вида при реализации i -го сценария аварии и k -м варианте ее головного события; U_{ikj} – брус учитываемого ущерба в денежном выражении, причиняемый j -му объекту-мишени при реализации i -го сценария аварии и k -м варианте ее головного события; $j = 1, 2, \dots, J$ – номер объекта-мишени.

Условные вероятности P_{ikj} должны учитывать: а) величину поражающего фактора i -го сценария аварии в месте расположения j -го объекта-мишени при k -м варианте головного события; б) вероятность нахождения объекта-мишени в данном месте (для подвижных объектов-мишеней); в) уязвимость объекта-мишени (условную вероятность поражения), в том числе, с учетом наличия у него защитных средств. В случае статистической независимости этих факторов величины соответствующих условных вероятностей могут быть перемножены.

Операция свертки брусков (интервальных матриц) по уравнениям (6) – (8) позволит выразить целевую метрику аварийного риска RR в виде интервального числа. При оценке, как ущерба, так и вероятности аварии следует проявлять внимательность, чтобы, с одной стороны, не упустить из виду некоторые сценарии аварии, с другой – не допустить дублирования (например, двойного учета ущерба). Последнее может иметь место, например, когда учитывается гибель людей, которые ранее уже были признаны погибшими от поражающих факторов более ранней фазы аварии (то же касается материального ущерба). Кроме того, при расчете эффектов поражения в необходимых случаях следует суммировать поражающие факторы (например, теплового излучения пожара пролива и факельного горения струи паров), действующих одновременно.

Для выполнения экономических оценок ущерба приняты следующие значения: а) стоимость резервуара РГС-75 [5, 6]· 10^5 рублей; б) стоимость резервуара РВС-200 [6,9,

7,2]·10⁵ рублей; в) оптовая цена бензина Аи-92 на начало 2018 года [3,7, 3,8]·10⁴ руб/м³; г) стоимость автобензовоза [2,2, 2,5]·10⁶ рублей; д) стоимость ж/д цистерны [4,5, 5,6]·10⁶ рублей; е) величина ССЖ [3, 4]·10⁷ рублей принята на основании Декларации Российского научного общества анализа риска.

Восстановительная стоимость зданий рассчитана на основании соответствующих Сборников укрупнённых показателей восстановительной стоимости (УПВС) 1969 г с учетом необходимых поправочных коэффициентов. Денежный эквивалент гуманитарного ущерба при нелетальных поражениях людей, экологического ущерба – рассчитаны в рамках действующего порядка, установленного нормативными документами Правительства России и Минприроды.

Расчеты выполнялись в следующей последовательности:

1) сначала был задан брус размерности 11×8 объектов-мишеней, попадающих в область поражения сценариев аварии (приведен в Таблице 8). В нем все 11 объектов-мишеней заданы вектор-строками, столбцы которых характеризуют декартовы координаты объектов в локальной системе координат, вероятность их нахождения, уязвимость к поражающим факторам аварии, экономические оценки и т.д.

Затем, для каждого варианта головного события, сценария аварии с учетом:

2) расстояний между центром аварии и объектами-мишенями была рассчитана величина поражающих факторов;

3) уязвимости объектов-мишеней к поражающим факторам – оценены условные вероятности причинения всем объектам-мишеням заданного ущерба в натуральном выражении, т.е. составляющие бруса P_{ijk} ;

4) подхода, изложенного в разделе 2.8 диссертации, была выполнена монетизация всех составляющих полного аварийного ущерба, по ее итогам составлен брус U_{ijk} ;

5) вероятности нахождения объекта-мишени в заданной точке и условной вероятности причинения ему ущерба поражающими факторами аварии, по совокупности объектов-мишеней для каждого k-го варианта ГС и i-го сценария аварии по формуле (8) рассчитан взвешенный ущерб U_{ik} ;

6) условной вероятности каждого i-го сценария аварии при k-м варианте ГС по формуле (7) рассчитан взвешенный ущерб U_k , отвечающий данному варианту ГС.

В завершение, с учетом вероятностей вариантов ГС аварии по формуле (6) для всех ВПОО были рассчитаны целевые метрики RR аварийного риска.

В качестве примера реализации метода в Таблице 9 приведены результаты расчета компонентов взвешенного аварийного ущерба на территории сливо-наливной эстакады светлых нефтепродуктов для двух вариантов (-3,b и -3,c) ее головного события. Взвешенный ущерб аварии для этих вариантов, рассчитанный по соотношению (7), оказался одинаковым: $U_{-3,b;-3,c} \in [1,1, 1,3] \cdot 10^7$ рублей, однако вероятности реализации данных вариантов ее ГС различны: $P_{-3,b} \in [3, 4,5] \cdot 10^{-3}$; $P_{-3,c} \in [1,9, 3,8] \cdot 10^{-5}$.

В целях апробации изложенного интервально-матричного метода КОР для пяти вышеперечисленных ВПОО нефтегазовой отрасли в четвертой главе диссертации были рассчитаны целевые метрики RR аварийного риска, которые оказались равными:

- а) резервуарного парка – $RR \in [0.065, 1.8] \cdot 10^4$ руб./год;
- б) насосной – $RR \in [0.01, 4.8]$ руб./год;
- в) сливо-наливной эстакады – $RR \in [0.088, 1.1] \cdot 10^5$ руб./год;
- г) АГЗС – $RR \in [3.9, 102]$ руб./год;
- д) технологического блока газораспределительной станции – $RR \in [43, 521]$ руб./год.

Сравнение этих пяти показателей позволяет сделать вывод, что наибольшая аварийная и пожарная опасность оценена для сливо-наливной эстакады светлых нефтепродуктов.

На пути широкого использования на практике интервальной постановки задачи при выполнении количественной оценки аварийного риска ВПОО нефтегазовой отрасли стоит пока нерешенная проблема сравнения целевых метрик риска, выраженных интервалами, с нормативами риска, заданными скалярными числами.

В четвертой главе диссертации предложен подход к ее решению, опирающийся на прецедент из области радиационной безопасности (метод нормирования радиационной безопасности продуктов питания, рекомендованный МАГАТЭ). Данный подход позволяет сравнить интервальную целевую метрику риска не только с нормативом, выраженным скалярным числом, но и с нормативом-интервалом (скаляр можно рассматривать как частный случай интервала, а именно как *вырожденный* интервал, у которого нижняя и верхняя границы совпадают).

Пусть рассчитанная целевая метрика аварийного риска некоего ВПОО объекта представлена интервалом $RR \in [a, \bar{a}]$, а норматив NR аварийного риска – интервалом $NR \in [b, \bar{b}]$, где a и b – нижние, \bar{a} и \bar{b} – верхние границы соответствующих интервалов (в частном случае $b = \bar{b}$). Согласно предложенному подходу следует принять, что:

А. Пожарная (промышленная) безопасность ВПОО *безусловно обеспечена*, если $RR < NR$, что эквивалентно $\bar{a} < b$;

Б. Пожарная (промышленная) безопасность объекта *безусловно не обеспечена*, если $RR > NR$, т.е. $a > \bar{b}$;

В. Необходимы меры по повышению его пожарной (промышленной) безопасности, если окажется $RR \cap NR \neq \emptyset$.

Это предложение полностью соответствует хорошо известному "принципу светофора" нормирования пожарной и промышленной безопасности.

Таблица 8 – Брус *ОВ* объектов-мишеней аварии на территории ВПОО "Резервуарный парк светлых нефтепродуктов"

Объект	Первый	Второй	Третий	Четвертый	Пятый	Шестой	Седьмой	Восьмой
obj_1.1	-30	[-40.5, 35]	0.1	2	1	1	2	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.2	0	0	1.0	0	2	0	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.3	29	101	0.24	1	1	1	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.4	29	[101, 115]	0.05	1	1	1	2	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_1.5	[12, 31]	[98, 112]	0.24	1	1	1	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
obj_2.1	-32	[-40.5, 35]	0.15	6	5	0	2	$[4.5, 5.6] \cdot 10^6$
obj_2.2	0	0	1.0	4	3	0	1	$[1.3, 1.6] \cdot 10^6$
obj_2.3	[12, 31]	101	0.24	6	5	0	1	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
obj_2.4	[12, 31]	[98, 112]	0.05	6	5	0	2	$[2.2, 2.5] \cdot 10^6$
obj_2.5	[95, 117.5]	[42.5, 65]	1.0	6	5	0	4	$[5, 6] \cdot 10^5$
obj_2.6	47.5	47.5	1.0	6	5	0	1	$[6.9, 7.2] \cdot 10^5$

Таблица 9 – Результаты расчета компонентов взвешенного ущерба при варианте головного события -3,в и -3,с аварии на территории сливо-наливной эстакады склада светлых нефтепродуктов

Сценарии аварии		Составляющие взвешенного ущерба U _{-3,в;-3,с}				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики сценария	Заданный ущерб (натуральный)	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
Пожар пролива, интенсивность падающего теплового потока I, кВт/м ²	[0.06, 0.3]	obj_1.1	[36.1, 38.4]	гибель	[0.062, 0.069]	[6, 8]·10 ⁷
				ожог I ст.	[0.55, 0.68]	[3, 8]·10 ⁶
				ожог II ст.	[0.09, 0.12]	[3, 8]·10 ⁶
		obj_1.2	[23.8, 25.6]	гибель	0	[3, 4]·10 ⁷
		obj_1.3	[24.5, 26.6]	гибель	[0.033, 0.038]	[3, 4]·10 ⁷
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[1.5, 4]·10 ⁶
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[1.5, 4]·10 ⁶
		obj_1.4	[24.5, 26.6]	гибель	[0.033, 0.038]	[6, 8]·10 ⁷
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[3, 8]·10 ⁶
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[3, 8]·10 ⁶
		obj_1.5	[24.5, 26.6]	гибель	[0.033, 0.038]	[3, 8]·10 ⁶
				ожог I ст.	[0.38, 0.41]	[3, 4]·10 ⁷
				ожог II ст.	[0.049, 0.052]	[1.5, 4]·10 ⁶
		obj_2.1	[26.1, 28.4]	возгорание	0	[1.5, 4]·10 ⁶
		obj_2.2	[23.8, 25.6]	возгорание	0	[9.0, 11.2]·10 ⁶
		obj_2.3	[24.5, 26.6]	возгорание	0	[1.3, 1.6]·10 ⁶
		obj_2.4	[24.5, 26.6]	возгорание	0	[2.2, 2.5]·10 ⁶
obj_2.5	[19.7, 23.1]	возгорание	0	[4.4, 5.0]·10 ⁶		
obj_2.6	[19.7, 23.1]	возгорание	1	[2,0, 2,4]·10 ⁶		
obj_3.1		загрязнение	1	[6.9, 7.2]·10 ⁵		
имущество		уничтожение	1	[8.2, 13]		
				[3.4, 5.3]·10 ³		

Продолжение Таблицы 9

Сценарии аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,b;-3,c}$					
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики сценария	Заданный ущерб (натуральный)	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей	
<i>Взрыв ТВС,</i> избыточное давле- ние взрыва ΔP , кПа; импульс фазы сжа- тия Γ^+ , Па·с	[0,02, 0.1]	obj_1.1	[3.7, 5.2] [0.00015, 0.87]	гибель контузия	0 0	[6, 8]·10 ⁷ [3, 4]·10 ⁶	
		obj_1.2	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	гибель лег. травма тяж. травма	0 0 0	[3, 4]·10 ⁷ [2.7, 3.6]·10 ⁶ [5.4, 7.2]·10 ⁶	
		obj_1.3	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 ⁷ [1.5, 2]·10 ⁶	
		obj_1.4	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	гибель контузия	0 0	[6, 8]·10 ⁷ [3, 4]·10 ⁶	
		obj_1.5	[0.47, 3.0] [0.0001, 0.17]	гибель контузия	0 0	[3, 4]·10 ⁷ [3, 4]·10 ⁷	
		obj_2.1	[3.7, 5.2] [0.00015, 0.87]	полное разр.	0	[1.5, 2]·10 ⁶ [9.0, 11.2]·10 ⁶	
		obj_2.2	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр. средн. разр.	0 0	[1.3, 1.6]·10 ⁶	
		obj_2.3	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр.	0	[6.1, 8.2]·10 ⁵ [2.2, 2.5]·10 ⁶	
		obj_2.4	[0.59, 2.3] [0.0001, 1.5]	полное разр.	0	[4.4, 5.0]·10 ⁶	
		obj_2.5	[0.7, 1.9] [0.0001, 0.19]	полное разр.	0	[2,0, 2,4]·10 ⁶	
		obj_2.6	[0.7, 1.9] [0.0001, 0.19]	полное разр.	0	[8.2, 13]	
		obj_3.1		имущество	загрязнение уничтожение	1 1	[3.4, 5.3]·10 ³

Окончание Таблицы 9

Сценарии аварии		Составляющие взвешенного ущерба $U_{-3,b;-3,c}$				
Сценарий, целевая метрика	Условная вероятность	Объект-мишень	Величина целевой метрики сценария	Заданный ущерб (натуральный)	Условная вероятность	Монетарная оценка, рублей
<i>Пожар-вспышка,</i> радиус зоны поражения R_F , м	[0.02, 0.1]	obj_1.1	[0.35, 4.5]	гибель	0	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.2	[0.35, 4.5]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.3	[0.35, 4.5]	гибель	1	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_1.4	[0.35, 4.5]	гибель	1	$[6, 8] \cdot 10^7$
		obj_1.5	[0.35, 4.5]	гибель	0	$[3, 4] \cdot 10^7$
		obj_3.1		загрязнение	1	[8.2, 13]
		имущество		уничтожение	1	$[3.4, 5.3] \cdot 10^3$
Рассеивание ТВС в атмосфере	[0.1, 0.5]	obj_3.1		загрязнение	1	[8.2, 13]
		имущество		уничтожение	1	$[3.4, 5.3] \cdot 10^3$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 На основании результатов, выполненных автором теоретических исследований разработаны научные основы методов анализа и количественной оценки неопределенности, сопровождающей процедуру количественной оценки аварийного (пожарного) риска взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли, предложен ее универсальный алгоритм, включающий пять этапов:

- 1) оценка параметров головного события аварии;
- 2) определение перечня сценариев аварии и их условных вероятностей;
- 3) оценка величины поражающих факторов аварии;
- 4) максимально полная оценка всех видов ущерба от аварии в натуральном выражении;
- 5) расчет денежного эквивалента всех составляющих полного аварийного ущерба.

2 Анализ действующих отечественных Руководств, по количественной оценке, аварийного (пожарного) риска позволил выявить основные содержащиеся в них источники терминологической, модельной, параметрической неопределенности. С целью ее минимизации в нормативно-методических документах по количественной оценке аварийного и пожарного рисков на взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли разработаны практические рекомендации.

3 Доказана возможность выполнения КОР объектов нефтегазовой отрасли в интервальной постановке. Параметры аварийного риска рассчитывались в рамках интервального анализа методами Р.Мура, глобальной оптимизации и аффинного представления параметров, а при наличии термодинамической связности параметров – с использованием комбинации этих методов, что позволило минимизировать вычислительную неопределенность интервальных расчетов.

4 В работе показано, что выполнение количественной оценки аварийного риска взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли в интервальной постановке позволяет быстро оценивать значимость параметров (параметрическую чувствительность) используемых физико-математических моделей аварийных процессов, что дает существенный выигрыш во времени в сравнении с традиционными методами статистического моделирования, применяемыми с этой целью.

5 Для целей риск-ориентированного управления пожарной и промышленной безопасностью взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли разработан интер-

вально-матричный метод оценки и управления аварийным риском. Данный метод, учитывая все возможные:

- варианты головного события аварии;
- сценарии ее дальнейшего развития;
- виды аварийного ущерба в монетарном выражении,

позволяет наиболее полно учесть аварийный риск рассматриваемого взрывопожароопасного объекта и оценить его комплексной целевой метрикой в виде интервального числа. Использование подобной метрики делает возможным управление риском – сравнение и ранжирование альтернативных решений на проектной стадии взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли, при разработке для них специальных технических условий (СТУ) и обоснований безопасности.

6 Разработанный интервально-матричный метод количественной оценки и управления аварийным риском успешно апробирован на пяти взрывопожароопасных объектах нефтегазовой отрасли, на которых обращаются пожароопасные вещества разного типа: легковоспламеняющаяся жидкость, компримированный природный газ, сжиженный углеводородный газ. Это доказывает универсальность предложенного метода.

7 Предложен метод нормирования интервальных метрик аварийного (пожарного) риска, имеющий существенное значение для управления пожарной и промышленной безопасностью взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли, как на проектной стадии, так и на стадии их эксплуатации, поскольку делает возможным обоснование управленческих решений с учетом наличия неопределенности.

Таким образом, в работе проанализированы основные источники неопределенности количественной оценки аварийного риска, изложен новый научно обоснованный подход к количественной оценке и управлению аварийным риском взрывопожароопасных объектов нефтегазовой отрасли в интервальной постановке, результатом которого является комплексная целевая метрика в виде интервального числа, содержащая оценку его неопределенности, внедрение которого внесет значительный вклад в развитие страны, так как данный подход позволяет существенно повысить их пожарную (промышленную) безопасность, поскольку, ликвидируя скрытую неопределенность точечных оценок, он улучшает информационное обеспечение выбора оптимальных решений при их проектировании и разработке для них защитных мероприятий.

Разработанные в диссертации методы анализа неопределенности и ее количественной оценки в интервальной постановке являются достаточно универсальными. Их объектной областью, наряду со взрывопожароопасными объектами нефтегазовой отрас-

ли, могут быть опасные технологические и транспортные объекты и других типов. Предметная область методов также принципиально не ограничена рамками анализа аварийного и пожарного рисков.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Монография

1 Колесников, Е.Ю. Анализ неопределенности пожарного риска: монография / Е. Ю. Колесников – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 204 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации основных результатов диссертационных исследований

1 Колесников, Е.Ю. Метод оценки техногенного риска на примере автомобильной газозаправочной станции / Е. Ю. Колесников // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 4. – С. 13 – 18.

2 Колесников, Е.Ю. Методика разработки паспорта безопасности опасного объекта на примере газифицированной котельной / Е. Ю. Колесников // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 6. – С. 11 – 18.

3 Колесников, Е.Ю. Практика разработки паспортов безопасности (на примере паспорта безопасности автомобильной заправочной станции) / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2007. – том 4. – № 2 – С. 106 – 128.

4 Колесников, Е.Ю. О методическом обеспечении оценки риска пожаро-взрывоопасных объектов / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2008. – том 5. – № 2. – С. 8 – 16.

5 Колесников, Е.Ю. Соображения по поводу "Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности" / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2009. – том 6. – № 4. – С. 92 – 94.

6 Колесников, Е.Ю. К вопросу о расчете и нормировании пожарных рисков / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2010. – том 7. – № 3. – С. 48 – 79.

7 Колесников, Е.Ю. Письма в редакцию. Дискуссия по методам оценки пожарного риска / Е. Ю. Колесников А. И. Эльнатанов // Проблемы анализа риска. – 2011. – том 8. – № 3. – С. 68 – 72.

8 Колесников, Е.Ю. К расчету массовой скорости испарения опасных веществ / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2011. – том 8. – № 5. – С. 84 – 91.

9 Колесников, Е.Ю. О неопределённости параметров, характеризующих безопасность / Е. Ю. Колесников // Безопасность в техносфере. – 2012. – № 3. – С. 73 – 78.

10 Колесников, Е.Ю. Об оценке неопределенности результатов анализа техногенного риска / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2012. – том 9. – № 4. – С. 8 – 46.

11 Колесников, Е.Ю. Способы количественной оценки неопределенности параметров техногенного риска / Е. Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 1. – С. 56 – 67.

12 Колесников, Е.Ю. О модельной неопределенности пожарного риска наземного резервуара с бензином / Е. Ю. Колесников // Пожаровз-рывобезопасность. – 2013. – Том 22. – № 3. – С.38 – 46.

13 Колесников, Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Часть 1 / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2013. – том 10. – № 2. – С. 48 – 71.

14 Колесников, Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Часть 2 / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2013. – том 10. – № 3. – С. 8 – 31.

15 Колесников, Е.Ю. Анализ техногенного риска: проблемы и неопределенности / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска 2013. – Том 10. – № 5. – С. 14 – 21.

16 Колесников, Е.Ю. Качественный анализ неопределенности пожарного риска. Сценарий аварии "Пожар пролива растворителя" / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2014. – том 11. – № 1. – С. 74 – 91.

17 Колесников, Е.Ю. Качественный анализ неопределенности аварийного риска взрыва типа BLEVE / Е. Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 4. – С.62 – 69.

18 Колесников, Е.Ю. Количественная оценка неопределенности пожарного риска. Сценарий аварии "Пожар пролива ЛВЖ" / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2014. – том 11. – № 4. – С. 70 – 84.

19 Колесников, Е.Ю. Количественная оценка неопределенности аварийного риска. Сценарий аварии "Длительное испарение пролива" / Е. Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности 2014 № 8 С. 78 – 84.

20 Колесников, Е.Ю. Качественный и количественный этапы оценки неопределенности аварийного риска / Е. Ю. Колесников, Э. Ш. Теляков // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – том 17. – № 23. – С. 424 – 427.

21 Колесников, Е.Ю. О роли методологии анализа риска в управлении пожарной и промышленной безопасностью / Е. Ю. Колесников, Э. Ш. Теляков // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – том 18. – № 1. – С. 285 – 287.

22 Колесников Е.Ю. Основные проблемы методологии анализа риска аварий / Е. Ю. Колесников, В. В. Анохин, Е. Ф. Маслов // Пожаровзрывобезопасность 2016 том 25 № 2 С. 5 – 9.

23 Колесников, Е.Ю. О нормировании интервальных значений аварийного риска (риска ЧС) / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2016. – том 13. – № 2. – С. 66 – 71.

24 Колесников, Е.Ю. Терминологическая неопределенность: опыт количественной оценки / Е. Ю. Колесников, Э. Ш. Теляков // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 7. – С. 82 – 88.

25 Колесников, Е.Ю. Количественная оценка аварийного риска: анализ неопределенности / Е. Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 2. – С. 64 – 70.

26 Колесников, Е.Ю. Количественная оценка аварийного риска: оценка параметрической чувствительности моделей и консервативности принятых допущений / Е. Ю. Колесников, Э. Ш. Теляков // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 3. – С. 63 – 67.

27 Колесников, Е.Ю. Интервальная оценка неопределенности параметров аварийного и пожарного рисков / Е. Ю. Колесников // Проблемы анализа риска . –2018. – том 15. – № 6. – С. 74 – 79.

Прочие публикации

1 Колесников, Е.Ю. Аспект неопределенности техногенного риска. *Materialy VIII Miedzynarodowej naukowo-practycznej konferencji "Aktualne problemy nowoczesnych nauk" 07 – 15 czerwca 2012. Vol. 47. Techniczne nauki –Przemysl : Nauka i studia, 2012. – pp. 94 – 97.*

2 Kolesnikov, E. Y. Uncertainty of probability component of accidental risk / E. Y. Kolesnikov // *Reliability : Theory & Applications.* – 2014. – vol. 9. – # 01. – pp. 81 – 84.

3 Колесников, Е.Ю. Интервальный способ выражения параметрической неопределенности пожарного риска // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: сб. ст. по материалам V Междунар. науч.-практ. конф., 18 – 19 сент. 2014 г.: в 2-х ч. Ч. 1 / ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России. – Воронеж, 2014. – С. 158 – 162.

4 Kolesnikov, E. Parameter and model uncertainty of technical risk estimation / E. Kolesnikov // Proceeding of the Twelfth international scientific school "Modeling and analysis of safety and risk in complex systems" (MA SR – 2014). – pp. 118 – 123.

5 Колесников, Е.Ю. Методология количественной оценки пожарного риска: неопределенности и пути совершенствования / Глобальная и национальная стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий: сборник трудов XX Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций – М.: ВНИИГОЧС МЧС России, 2015. – С. 172 – 176.

6 Колесников, Е.Ю. Анализ аварийного риска: проблемы методологии / Е. Ю. Колесников // Анализ риска – 2015: проблемы теории и практики: материалы Всероссийской научно-практической конференции –Йошкар-Ола 6 Поволжский государственный технологический университет, 2015. – С. 5 – 9.